



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## 3D TISK KOVŮ ROBOTEM

3D METAL PRINTING BY ROBOT

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Radek Tvrdoň**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Marian Sigmund, Ph.D.**

**BRNO 2021**

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Radek Tvrdoň</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>Ing. Marian Sigmund, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## 3D tisk kovů robotem

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

3D tisk kovů patří mezi moderní aditivní technologie a obzvláště ve strojírenských oborech, kde stoupá požadavek mnohdy na dlouhé termíny dodání odlévaných a kovaných výrobků ze speciálních materiálů. Stoupá tedy potřeba nahradit tyto výrobky 3D tiskem kovů. V této diplomové práci se bude jednat o studium proveditelnosti 3D tisku kovů drátem, vhodnou technologií na vhodných výrobcích, na robotizovaném pracovišti, včetně návrhu investic potřebných pro modernizaci stávajícího pracoviště. Optimalizace procesních parametrů 3D tisku a 3D tisk vzorku drátem a jeho kvalitativní vyhodnocení.

### Cíle diplomové práce:

Studium proveditelnosti 3D tisku kovů drátovou metodou robotem pro stávající pracoviště.  
Literární rešerže materiálových, mechanických a kvalitativních požadavků svažitelnosti dílů vyrobených 3D tiskem drátovou metodou.  
Studium a optimalizace procesních parametrů při 3D tisku drátovou metodou.  
Po odladění procesu, případný 3D tisk vzorku drátovou metodou pro kvalitativní vyhodnocení.  
Návrh potřebných modernizací a upgrade pro 3D tisk kovů stávajícího robotizovaného pracoviště.

### Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan. Technologie II. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.

PILOUS, Václav. Materiály a jejich chování při svařování, 1. vyd. ŠKODA-WELDING, Plzeň, 2009.

FOLDYNA, Václav. Materiály a jejich svažitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.

AMBROŽ, Oldřich. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.

MAJER, Lubomír. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 1999. ISBN 80-85771-70-5.

BARTÁK, Jiří. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2000. ISBN 80-85771-72-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

TVRDOŇ Radek: 3D tisk kovů robotem.

---

Diplomová práce předkládá přehled technologií aditivní výroby a souhrn technologií používaných pro 3D tisk kovů pomocí robota. Všechny obecně popisuje a zároveň uvádí jejich konkrétní komerční využití, nebo akademický výzkum, který se jimi zabývá. Práce zkoumá vhodnost materiálu EN ISO 14341-A: G 3Si1 k 3D tisku, k čemuž je použita modifikace technologie Cold Metal Transfer, Cycle Step. Experimentální výtisk vzorku je vyhodnocen na základě povrchových a mechanických zkoušek. Zkoušky kapilární, zkoumání mikrostruktury a makrostruktury, tahové zkoušky a zkoušky mikrotvrdomosti. Všechny testy byly vyhovující a potvrdila se vhodnost svařovacího drátu k 3D tisku danou technologií.

Klíčová slova: 3D tisk, svařování, cold metal transfer, technologie aditivní výroby

## **ABSTRACT**

TVRDOŇ Radek: 3D metal printing by robot.

---

The diploma thesis presents an overview of additive production technologies and a summary of technologies used for 3D metal printing using a robot. All of them are generally described and at the same time assigned to their specific commercial use, or the academic research that deals with them. The work examines the suitability of the material EN ISO 14341-A: G 3Si1 for 3D printing, for which a modification of the Cold Metal Transfer technology, Cycle Step is used. The experimental printout of the sample is evaluated on the basis of surface and mechanical tests. Capillary test, examination of microstructure and macrostructure, tensile test and microhardness test. All of them were satisfactory and the suitability of the welding wire for 3D printing was confirmed by the given technology.

Keywords: 3D printing, welding, cold metal transfer, technology of additive manufacturing

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

TVRDOŇ, Radek. *3D tisk kovů robotem* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129716>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Marian Sigmund.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 21. 5. 2021

.....  
Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Mariánovi Sigmundovi, PhD. za cenné připomínky, odborné vedení a rady týkající se zpracování diplomové práce. Panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, PhD. za výtisk experimentálních vzorků. Panu Ing. Tomáši Herčíkovi za pomoc při testování experimentálních vzorků. Panu Ing. Kamilovi Podanému, PhD. za skvělé vedení semináře k diplomové práci a taky za pomoc při experimentálních mechanických zkouškách. Své rodině děkuji především za mentální podporu v průběhu celého studia.

# OBSAH

Zadání  
Abstrakt  
Bibliografická citace  
Čestné prohlášení  
Poděkování  
Obsah

ÚVOD .....	10
1 ROZBOR ZADÁNÍ .....	13
1. 1 Metody aditivní výroby.....	14
1.2 Metody zkoušení výrobků 3D tisku .....	17
1. 2. 1 Povrchové požadavky- vzhled.....	17
1. 2. 2 Povrchové požadavky- kapilární zkouška .....	18
1. 2. 3 Povrchové požadavky- drsnost.....	18
1. 2. 4 Geometrické požadavky .....	19
1. 2. 5 Mechanické požadavky-hodnocení tvrdosti.....	19
1. 2. 6 Mechanické požadavky-hodnocení pevnosti v tahu .....	20
1. 2. 7 Hodnocení makro a mikrostruktury] .....	21
2 TEORIE SVAŘOVÁNÍ A 3D TISKU.....	23
2.1 Tepelně ovlivněná oblast.....	23
2. 2 Zbytková napětí .....	24
2. 3 Svařitelnost.....	25
2. 3. 1 Prvky ovlivňující svařitelnost .....	25
2. 3. 2 Uhlíkový ekvivalent.....	25
2. 4 Přenos kovu .....	26
3 DIRECT ENERGY DEPOSITION.....	27
3.1 WAAM .....	29
3. 1. 1 Metal Inert Gas/Metal Aactive Gas .....	31
3. 1. 2 Cold metal transfer .....	33
3. 1. 3 CMT Cycle Step .....	35
3. 1. 5 Wolfram Inert Gas .....	37
3. 1. 6 Plasma Arc Welding .....	38
3. 2 Electron Beam Additive Manufacturing .....	39
3. 3 Wire-Laser Additive Manufacturig .....	40
3. 4 Hybridní stroje .....	41



3. 5 Hybridní technologie .....	42
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	43
4. 1 Svařovací drát .....	45
4. 2 Tisk vzorku .....	46
4. 3 Vyhodnocení požadavků pro 3D výtisk.....	47
4. 3. 1 Povrchové požadavky-kapilární zkouška .....	48
4. 3. 2 Povrchové požadavky-mikro a makrostruktura .....	49
4. 3. 3 Mechanické požadavky - pevnost v tahu.....	54
4. 3. 4 Mechanické požadavky - tvrdost.....	58
5 ZÁVĚRY .....	60
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek a grafů	
Seznam příloh	

## ÚVOD [1] [2] [3]

Počátkem nového tisíciletí se jedním z hlavních zaměření firem z celého světa stala produktivita. Pro její zlepšení se do výroby zavádí víc a víc počítačové automatizace. Mezi nejvýznamnější technologie posledních dekád se řadí Rapid Prototyping, také znám jako 3D tisk, nebo vzhledem k ASTM standardům formálně nazvané Additive Manufacturing (AM), aditivní výroba. Příklady možností a použití lze vidět na obrázku 1. Bezpočet korporací, vládních agentur, výzkumů a dalších zkoumají tyto technologie ve větší míře než kdykoli dřív.

Průmysl aditivní výroby naráží na spoustu výzev. Mezi ně se řadí celková spolehlivost systémů a procesů, především při použití AM ve výrobě. Výrobci samotných systémů aditivní výroby řeší tyto výzvy pomocí monitorování procesu tisku a kontroly softwaru v reálném čase. Přesto je potřeba ještě spousta práce, aby vše fungovalo na sto procent. Další výzvou jsou aktuální limity v rychlosti 3D tisku a maximálních rozměrech výtisků.

První firmy používající aditivní technologie pro sériovou výrobu jsou z oblastí letectví, medicíny, nebo stomatologie a několika produktů pro konečné zákazníky. Většinou se jedná o součásti a výrobky s relativně malými objemy sérií, nebo naopak vysoce specifické a komplexní. Díky zvyšování rychlosti tisku jsou tyto technologie levnější a je možné je použít ve více oblastech jako náhradu konvenčních způsobů výroby. Nejlepším příkladem je automobil, ve kterém se posledních 20 let AM využívalo pouze k prototypování, ne k samotné výrobě součástí. Toto se v budoucnu změní.



Obr. 1: Ukázky 3D tisku nahoře dvě struktury, dole vlevo lodní hák, vpravo forma [2], [3]

# 1 ROZBOR ZADÁNÍ [1] [2] [3] [4]

Aditivní výroba (AM-Additive Manufacturing, 3D print atp.) je podle ASTM (American Society for Testing and Materials) definována jako proces spojování materiálů pro vytvoření objektu z virtuálního CAD modelu tak, že se na sebe postupně skládají vrstvy určitého materiálu a tím se dosahuje různých finálních tvarů podle CAD předlohy. Aktuálně prochází AM velmi dynamickým vývojem. Je často užíváno k prototypové výrobě, na výrobu komponent strojů a konstrukcí z mnoha materiálů.

Pro 3D tisk je každým rokem používáno víc a víc technologií, nebo jejich obměn či inovací. Na tento obor průmyslu je kladen vysoký důraz, jak ve státních, tak soukromých sférách. Technologie s nejpřesnějšími výslednými rozměry součástí jsou spojovány s použitím Powder Bed Fusion. Naopak z pohledu hmotnosti vytisknutého materiálu za čas jsou nejefektivnější technologie obloukového (drátového) svařování WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing).

AM je složitý proces spojující různá technologická odvětví dohromady. Aby bylo možno dosáhnout požadovaných mechanických vlastností výrobku, je nutno myslet na vhodné technologické parametry svařovacího procesu, programování robota a v neposlední řadě na znalosti termální analýzy.

Na rozdíl od obrábění vzniká při 3D tisku minimum odpadu. Poměr BTF (buy to fly) je ve velmi dobrém poměru, což je jeden z hlavních důvodů, proč se tato technologie stále častěji využívá. BTF je poměrné číslo mezi hmotností „vstupního“ materiálu (polotovaru u obrábění) a hmotností „výstupního“ hotového výrobku. U konvenčních způsobů výroby je tento poměr běžně 10:1 až 30:1. O 35-45 % se poměr sníží při využití 3D tisku. Některé studie předvídají, že při jeho použití se může např. cena letadla snížit o 60 % a jeho hmotnost až o 30 %. Další výhodou oproti obrábění je možnost vyrábět součásti a komponenty relativně jednoduchých tvarů, avšak konvenčními technologiemi obtížně vyrobitelných, nevyrobitelných, nebo výrobně neekonomických (např. odlehčené a duté profily, rotační součásti s výztuhami atp.).

Několik největších firem světa jako Adobe, Autodesk, Lockheed Martin, Siemens a Stryker si vytvořily vůči AM závazky, některé z nich velmi významné. Na samém vrcholu cenového žebříčku firmy usilují o stroje a materiály k přímé výrobě finálních součástí. Letecké společnosti jako Airbus, Bell Helicopter, Boeing a Honeywell Aerospace kvalifikují procesy AM i materiály a certifikují nové produkty použité v letectví. V dubnu roku 2016, GE Aviation dodal Airbusu první dvouproudové motory, v němž byly použity 3D tiskem vyrobené palivové trysky. Jednu z nich můžeme vidět na obrázku 2. Pokročilý design spojil 20 součástí do jedné o 25 % lehčí a pětkrát odolnější. Do října roku 2018 prodala GE Aviation 30.000 kusů těchto trysek a dále je sériově vyrábí. Začátkem roku 2018 Česká pobočka firmy Huisman vyrobila celosvětově první lodní hák pomocí technologie WAAM. S rozměry 70 x 50 x 10 cm a váhou 90 kg má hák nosnost 80 tun, přičemž prošel nejpřísnějšími testy. Dodací lhůta, která byla při kování háku několik měsíců, se snížila na necelé dva měsíce. MAG metodou trval tento tisk robota Panasonic čistého času 23hodin a 4 minuty.



Obr. 2: Palivová tryska vyrobená 3D tiskem [4]

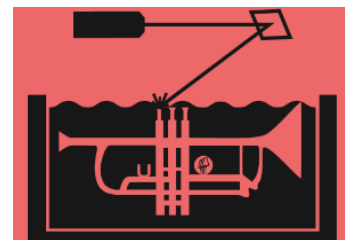
## 1. 1 Metody aditivní výroby [5] [6] [7] [8] [9] [12] [22] [23] [47]

Každý rok přibývají další modifikace a vylepšení všech oblastí týkajících se AM. Pro jejich klasifikaci jsou používány různé normy. Největšími institucemi, které normy vydávají a snaží se o jejich vzájemnou korelaci jsou American Society for Testing of Materials (ASTM) výbor F42, American Society of Mechanical Engineers (ASME) výbor Y14 a International Organization for Standardization (ISO) výbor TC/261. Další subjekty zapojené do standardizace procesů jsou American Welding Association (AWS), Association Connecting Electronic Industries (IPC), National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Normy se týkají celého výrobního procesu aditivní výroby, a to sice softwaru, softwarových formátů, designu, testování výrobků a jejich metod, hodnocení materiálů, základních principů AM a jejich specifikací, celkové terminologie a v neposlední řadě požadavků pro nákup a prodej aditivně vyrobených součástí. Pro všechny tyto oblasti jsou nutné standardy, normy a systém hodnocení kvality, aby bylo možné vytvářet produkty odpovídajících vlastností dle provozních požadavků. Umožňují vzájemnou komunikaci a porozumění mezi různými subjekty a také dávají základní znalosti, které mohou přispět k implementaci aditivní výroby do firem. V roce 2015 evidovaly ISO a ASTM 20 schválených norem. V roce 2018 bylo v součtu 45 schválených a navrhovaných norem. Designu, výrobním procesům a materiálům se věnuje 55 % těchto norem. Testování a zpracování dat o mechanických vlastnostech 24 %. Kvalifikaci, certifikaci dílů a aplikacím 21 %. Vzhledem k technologiím aditivní výroby budou nové normy zaměřeny z 50 % na Powder Bed Fusion, 33 % na Material Extrusion a 17 % na Directed Energy Deposition.

Podle české normy ČSN EN ISO 17296-2: 2017 (ekvivalentu ISO normy ISO 17296-2:2015) se mezi základní procesy aditivní výroby řadí:

- Vat Photopolymerization (Fotopolymerizace) obrázek 3. Využívá světelný paprsek s určitou vlnovou délkou, jež ozařuje kapalnou fotopolymerní pryskyřici v nádobě. Ta se díky chemické reakci, zvané fotopolymerizace, mění na pevnou fázi. Stavební platforma uložená v lázni se posouvá vertikálně po výtisku jednotlivých vrstev, vždy o výšku vrstvy.
- Binder Jetting (Tryskání pojiva) obrázek 4. Funguje na principu ukládání práškového tiskového materiálu na povrch celé plochy lóže s následným selektivním spojováním pomocí kapalného pojiva v podobě kapek, tryskaného z tiskové hlavy. Po ztuhnutí pojiva je dokončena vrstva, stavební platforma je vertikálně posunuta o výšku jedné vrstvy dolů a celý proces se opakuje. Technologiemi založenými na tomto principu se tisknou plasty, kov, keramika, sklo i písek.
- Material Jetting (Tryskání materiálu) obrázek 5. Využívá většího množství tryskových hlav, které jsou v jedné řadě vedle sebe. Na jeden průjezd soustavy hlav se zaplní celá pracovní plocha tisknutým i podpurným materiálem, případně více různými materiály (což je největší výhodou této technologie) a zároveň jsou materiály při totožném průjezdu vytvrzovány zdrojem UV záření. Toto technologií jsou tisknuty fotopolymery, polymery a vosky.



Obr. 3: Vat Photopolymerization [8]

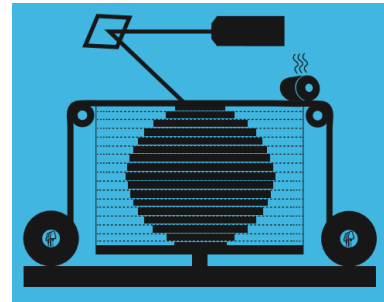


Obr. 4: Binder Jetting [8]



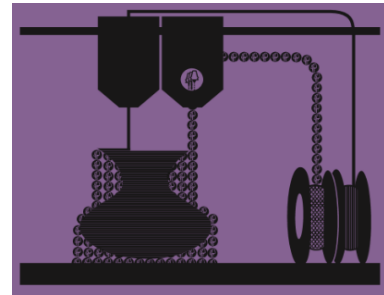
Obr. 5 Material Jetting [8]

- Sheet Lamination (Laminace plátů) obrázek 6. Spočívá ve vrstvení plechů (nebo papírů) na sebe. Plechy se následně ultrazvukově svaří, nebo slepí k sobě. Poté jsou laserem nebo nožem ořezány do tvaru odpovídající dané vrstvě. Pracovní platforma je posunuta o výšku vrstvy dolů a celý proces se opakuje, dokud není výrobek hotov. Používají se většinou plechy z papíru, plasty, nebo kovů.



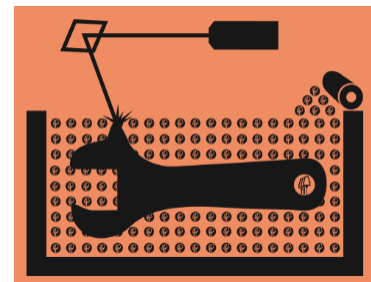
Obr. 6 Sheet Lamination [8]

- Material Extrusion (Vytlačování materiálu) obrázek 7. Je jedna z nejrozšířenějších technologií aditivní výroby. Funguje na principu protlačování filamentu ve formě vláken skrz protlačovací trysku, která materiál natavuje. Tryska je pohyblivá ve dvou až třech osách a nanáší materiál na konkrétní místa podle CAD předlohy, dokud nedojde k vytvoření první vrstvy. Následně se hlava posune o výšku jedné vrstvy nahoru, nebo pracovní deska o stejnou výšku dolů, a proces se opakuje. Je možno tisknout různé druhy termoplastů jako nylon, ABS a další. Touto technologií disponují 3D tiskárny Prusa Research, česká firma dodávající tiskárny do celého světa.



Obr. 7 Material Extrusion [8]

- Powder Bed Fusion-PBF (Fúze v práškovém lóži) obrázek 8. Do kterého patří SLS-Selective Laser Sintering, DMLS-Direct Metal Laser Sintering, SLM-Selective Laser Melting, EBM-Electron Beam Melting. Je to technologie založená na spékání, nebo natavování materiálu v podobě prášku. Prášek je nanesen celoplošně na pracovní plochu a následným tepelným účinkem na přesných místech spojen s předchozí vrstvou. Tepelným zdrojem bývá laser, nebo elektronový paprsek umístěný na pohyblivé hlavě. Po spojení vrstvy se pracovní platforma posune o výšku jedné vrstvy dolů a proces se opakuje. Nespojený materiál slouží jako podpůrný. Používají se materiály plasty, keramiky, písku a především kovu.



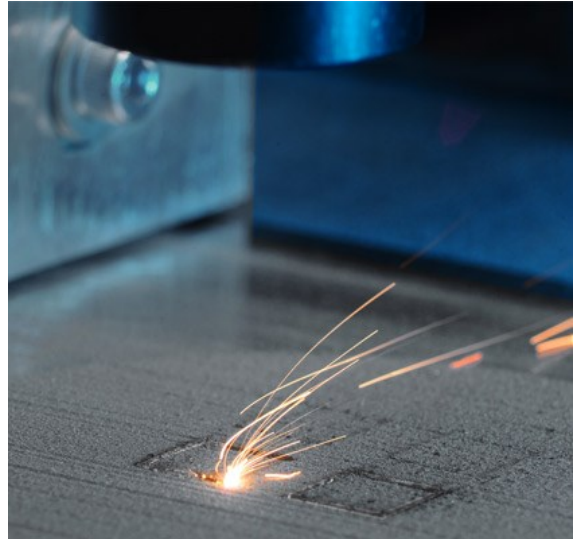
Obr. 8 Powder Bed Fusion [8]

- Directed Energy Deposition-DED (Přímé energetické nanášení) obrázek 9. Do kterého patří LMD-Laser Metal Deposition, DMD-Direct Metal Deposition, WAAM-Wire and Arc Additive Manufacturing. Spočívá v přívádění materiálu ve formě prášku, nebo drátu (z keramiky, nebo kovu) do nataveného místa materiálu. To je vytvořeno za pomoci zdroje tepla. Tím může být laser, elektrický oblouk, plasma nebo elektronový paprsek. Jde o způsob automatického navařování jednotlivých vrstev na sebe.

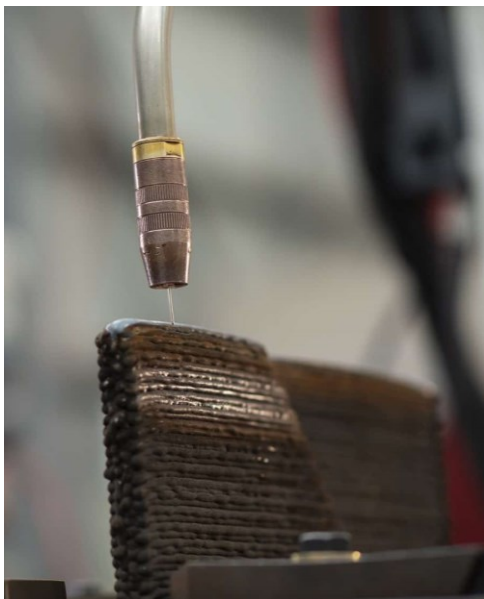


Obr. 9 Directed Energy Deposition [8]

Poslední dvě zmíněné metody PBF na obrázku 10 a DED na obrázku 11 jsou hlavními představiteli 3D tisku kovů. Základní systémy aditivní výroby se skládají z kombinace pohyblivého aparátu, tepelného zdroje a vstupního materiálu. Díky své vnitřní charakteristice je každá technologie vhodná pro jinou aplikaci. Výroba pomocí PBF přináší komponenty s vysokou přesností avšak vzhledem k vytisknutému materiálu za čas je pomalá. Zároveň je u těchto technologií omezení velikosti součástí pracovním prostorem. Jsou tedy vhodné pro výrobky malých rozměrů s velkou komplexitou. Oproti tomu technologiemi DED je možno vytisknout velké komponenty výrazně rychleji a levněji, ovšem s menší přesností. Pracovní prostor je u nich omezen pouze manipulátorem (robotem, portálem, nebo CNC strojem).



Obr. 10: Powder Bed Fusion [22]



Obr. 11: Direct Energy Deposition [23]

Diplomová práce se zaměřuje na drátové technologie, proto technologie založené na tavení prášku nejsou popsány. Lze vyčlenit větší skupinu DED technologií využívajících tavení drátu nazvanou WAAM, která zastřešuje metody 3D tisku pomocí MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas), nebo také GMAW (Gas Metal Arc Welding), WIG/TIG (Wolfram/Tungsten Inert Gas), nebo také GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) a plasmu- PAW (Plasma Arc Welding). Další technologie ze skupiny DED využívají k tavení drátu laser a elektronový paprsek.

Hlavními byznysovými důvody využití aditivní výroby jsou volnost v designu, výroba na míru a možná redukce času výroby součástí. Je zde také obecné zaměření na redukci spotřebovaného materiálu primárně kvůli složitosti produkce a zpracování titanu, jež jsou finančně nákladné. Při použití topologické optimalizace – metody využívající matematiku pro dosažení optimálního poměru mezi vahou a odolností – je možné vyrábět součásti až o 50 % lehčí. Snížit hmotnost součástí a spotřebu materiálu můžeme také tím, že plné stěny nahradíme vnitřní mřížkou, nebo jinou vnitřní strukturou, což je běžnými obráběcími metodami nemožné. Při spojení více součástí do jedné, nebo méně součástí dojde ve firmách ke snížení počtu součástí, inventářů, montáží, odpracovaných hodin dělníků, inspekcí a supervizí, údržby strojů a v neposlední řadě certifikačních a byrokratických procesů.

## 1.2 Metody zkoušení výrobků 3D tisku [46]

Norma ČSN EN ISO 17296-3 popisuje jaké charakteristiky výrobku je potřeba pozorovat, podle toho v jaké kategorii se výrobek nachází (kritická bezpečnostní součást – vysoké nároky, funkční součást bez kritické bezpečnosti – střední nároky, designová, testovac, nebo prototypová součást – nízké nároky). Sleduje požadavky na povrchové, geometrické, mechanické vlastnosti výrobku a taky požadavky na materiálové vlastnosti. Všechny jsou popsány v tabulce 1. Charakteristiky označené znaménkem “+“ by měly být splněny, znaménkem “o“ jsou doporučeny a znaménkem “-“ nejsou vyžadovány. Pro experimentální vzorek v diplomové práci se jedná o třetí kategorii s nízkými nároky.

Tabulka 1: Charakteristiky výrobku 3D tisku [46]

Požadavky na výrobek	Povrchové požadavky			Geometrické požadavky		Mechanické požadavky		
	Vzhled	Povrchová textura	Barva	Rozměry, rozměrové tolerance	Geometrické tolerance	Tvrдость	Pevnost v tahu	Houževnatost
Vysoké	o	+	-	+	+	+	+	+
Střední	o	o	-	+	+	+	+	+
Nízké	o	o	-	+	+	+	+	o

Mechanické požadavky							
Pevnost v tlaku	Pevnost v ohybu	Únavová pevnost	Creep	Stárnutí	Koeficient tření	Pevnost ve střihu	Šíření trhliny
+	+	+	+	-	+	+	+
+	o	o	o	-	o	o	o
o	o	-	-	-	-	o	-

Požadavky na základní materiál	
Hustota	Fyzikální a fyzikálně-chemické vlastnosti
+	+
+	o
+	-

Norma ČSN EN ISO 17296-3 dále předkládá výčet starších norem, podle kterých jsou testovány všechna kritéria vytisknutých součástí z tabulky 1. V dalších kapitolách jsou tyto požadavky rozebrány na základě norem. Vzhledem k progresivnímu vývoji aditivní výroby jsou specifické charakteristiky a požadavky na výrobky 3D tisku stále v procesu tvorby. Aktuálně jsou součásti vyráběny a prodávány na základě certifikací a přísných zátěžových testů.

### 1.2.1 Povrchové požadavky- vzhled [46] [47]

Tento povrchový požadavek je podle normy o 3D tisku 17296-3 hodnocen na základě normy o vzhledu ČSN EN ISO 16348 ve které jsou definovány pojmy: vzhled, stejnoměrnost vzhledu, kaz, viditelná vada. Vzhled (appearance) funkčního povrchu zahrnuje všechny jeho vizuální charakteristiky. Stejnoseměrný vzhled (uniformity of appearance) je definován jako stav, při kterém jsou vizuální charakteristiky funkčních povrchů součástí (součástí) stejné.

Kaz (blemish) je povrchová nedokonalost nebo odchylka od vzhledu, který je stanoven referenčním materiálem, ale nemusí zhoršit funkčnost výrobku. Viditelná vada (visible defect) je nepřijatelná fyzikální nedokonalost, případně chyba v povrchu a nepříznivě se odlišuje od referenčního materiálu, nebo zhoršuje funkčnost výrobku.

Norma udává, že pokud je vzhled stanoven jako požadavek na výrobek musí být upřesňující údaje zkoušky vzhledu i jejího vyhodnocení stanoveny příslušnou normou na výrobek. Pokud v normě na výrobek žádná testovací metoda není předepsána, použije se k ověření vzhledu a stejnosměrnosti vzhledu srovnávací metoda. K tomu je potřeba schválený referenční vzorek.

Referenčních vzorků může být schválených více. Charakterizují změny parametrů v daném výrobním procesu. Vzorky musí být vyrobeny stejným postupem jako předmět zakázky/výzkumu. Tím se zajistí úplná shoda a reprodukovatelnost výroby.

Podmínky kontroly (typ osvětlení, úhel dopadu světla, zvětšení, vzdálenost) musí být dohodnuty při objednání.

Protokol o zkoušce musí obsahovat alespoň tyto údaje: typ zkoušky a/nebo označení specifikace, podmínky zkoušení, údaje o zkoušených vzorcích, podmínky vyhodnocení/kontroly, veškeré odchylky od normy na výrobek.

### **1. 2. 2 Povrchové požadavky- kapilární zkouška [46] [48]**

Penetrační kontrola je popsána normou ČSN EN ISO 3452 a jejími částmi. První část popisuje obecné zásady zkoušky a také požadavky na procesní a kontrolní zkoušky, které jsou popsány dále. Metoda kapilární zkoušky je využívána pro zjištění diskontinuit zkoušeného povrchu, jako jsou přeložky, trhliny, póry, rýhy a studené spoje.

Norma upozorňuje na bezpečnostní opatření při provádění zkoušky. Látky k ní používané mohou být zdraví škodlivé, hořlavé, nebo těkavé. Je nutné zabránit dlouhodobému kontaktu s pokožkou nebo sliznicí. Pracovní prostory musí být dostatečně odvětrávány a zároveň vzdáleny od tepla, jisker nebo otevřeného ohně.

Před započítím zkoušky je nutné zkoušený povrch očistit a osušit. Následně jsou vhodné penetranty nanášeny na zkoušenou plochu. Vznikají do diskontinuit otevřených na povrchu. Po uběhnutí předepsané penetrační doby je přebytečný penetrant odstraněn ze zkoušeného povrchu a je nanášena vývojka. Ta absorbuje penetrant, který vzniknul a zůstal v diskontinuitách čímž vytváří jasně viditelné, zvětšené indikace diskontinuity.

Zařízení používané pro penetrační zkoušku jsou popsána v normě 3452-4. Podle normy 3452-2 penetrant a prostředek k jeho odstranění musí být vyroben jedním výrobcem.

Zkoušený materiál musí být kompatibilní se zkušebními prostředky, aby nedošlo k poškození součásti. Ve většině případů je možné ověřit kompatibilitu pomocí zkoušky na korozi, která je podrobně popsána v normě 3452-2.

V protokolu o zkoušce musí být zapsány informace s ohledem na normu 3452: údaje o zkoušené součásti (označení, rozměry, materiál, stav povrchu, stadium výroby), účel zkoušky, označení použitého penetračního systému, zkušební instrukce, odchylky od zkušební instrukce (existují-li), výsledky zkoušky (popis zjištěných diskontinuit), místo a datum zkoušky, jméno zkoušejícího, jméno, kvalifikace a podpis zkušební dozor.

Druhá část normy 3452 udává technické požadavky zkoušení a zkušební postupy pro specifické zkoušky šarže kapilárních prostředků.

### **1. 2. 3 Povrchové požadavky- drsnost [70] [71]**

Specifikace drsnosti jsou popsány v normě ČSN EN ISO 1302, která obsahuje podrobný popis pravidel značení struktur povrchu, drsnosti, vlnitosti, základního profilu výrobku, nebo vzorku na technických výkresech pomocí grafických značek a textu.



Povrchové požadavky se označují jako parametry profilu podle ISO 4287, vztaženým k R-profilu (parametry drsnosti), W-profilu (parametry vlnitosti) a P-profilu (parametry struktury).

Základní označení struktury povrchu obsahuje jeho samotný předpis a číselnou hodnotu. Dále může obsahovat doplňkové informace/požadavky, čímž je vytvořena úplná grafická značka. Ta obsahuje navíc některé parametry, např. přenosové pásmo, základní délku, směr nerovností, výrobní proces, nebo možné přídavky na obrábění. Ty jsou důležité k zajištění požadavků pro více různých parametrů struktury povrchu za předpokladu, že požadavky na povrch zajišťují jednoznačné funkční vlastnosti povrchu.

Norma ČSN EN ISO 4288 stanovuje pravidla pro porovnání měřených hodnot s tolerančními mezemi, které jsou stanoveny pro parametry struktury povrchu v normě ČSN EN ISO 4287 a dalších normách ISO. Taktéž specifikuje standardizovaná pravidla pro výběr mezních vlnových délek (cut-off  $\lambda_c$ ) pro parametry profilu drsnosti (dle ISO 4287), které jsou měřeny pomocí dotykových hrotových přístrojů (dle ISO 3274).

Při inspekci drsností je nutná vizuální kontrola povrchu. Je-li homogenní, postačí jedno měření drsnosti, které je pak porovnáno s předpisem na výkrese. Není-li homogenní, měří se drsnost na všech vizuálně odlišných plochách a následně jsou všechny porovnávány s výkresem.

Pravidlo 16 % udává podmínku, kdy maximálně 16 % měřených hodnot může přesáhnout spodní a vrchní hranici vybraných parametrů, zjištěných na vyhodnocované délce v porovnání s výkresovou, nebo výrobní dokumentací.

Při použití pravidla maxima nesmí žádná z hodnot parametru přesáhnout tu, která je uvedena na výkresu, nebo výrobní dokumentaci. To platí na celém kontrolovaném povrchu.

#### **1. 2. 4 Geometrické požadavky [46]**

Podle normy o 3D tisku 17296-3 by se všechny geometrické náležitosti (tolerance, rozměry, úchyly, kótování atp.) měly řídit odpovídajícími normami (ISO 129-1, ISO 286-1, ISO 14405-1, ISO 1938-1, ISO 2768-1, ISO 1101, ISO 2768-2). Všechny měření a kótování 3D výtisků se shodují s měřeními a kótováními jiných strojních součástí a patří mezi základní znalosti. Proto zde nebudou dále popsány.

#### **1. 2. 5 Mechanické požadavky-hodnocení tvrdosti [46] [49]**

Na základě normy o 3D tisku 17296-3 je tvrdost výtisků měřena podle normy ČSN EN ISO 6507, tedy zkouškou tvrdosti podle Vickerse. První část normy popisuje postup provedení zkoušky a všechny potřebné náležitosti. Druhá část popisuje měřicí stroje. Třetí část kalibraci referenčních destiček, podle kterých se nepřímou ověřují zkušební stroje. Čtvrtá část obsahuje převodní tabulku hodnot tvrdosti, aby bylo možné podle rozměrů vtisku odvodit tvrdost materiálu.

Principem zkoušky je vtlačení indentoru v podobě diamantového pravidelného čtyřbokého jehlanu (se čtvercovou základnou a předepsaným vrcholovým úhlem) do povrchu zkušební vzorku s následným měřením délek uhlopříček vtisku, který zůstane po odlehčení zatížení.

Vzdálenost mezi středy jednotlivých vtisků a okrajem vzorku musí být minimálně 2,5násobek průměrné délky uhlopříčky vtisku. vzdálenost mezi jednotlivými vtisky musí být minimálně trojnásobek průměrné délky uhlopříčky vtisku.

Podmínkou pro zkušební stroj je jeho schopnost vyvinout stanovené zatížení, nebo zatížení v požadovaném rozmezí zkušebních zatížení a provádět vtisky silou, jejíž směr svírá 45° s plochou zkušební vzorku.

Zkoušku je nutno provádět na hladké, rovné, vyleštěné ploše, bez oxidických okují a jiných látek zejména olejů, nebo maziv. Vyleštěný povrch musí umožnit přesné určení délky uhlopříček vtisku.

Délky uhlopříček jsou měřeny pomocí mikroskopu, kdy uhlopříčka musí dosáhnout víc než 25 % a zároveň méně než 75 % zorného pole mikroskopu.

Značka tvrdosti podle Vickerse je označena HV a vypočítá se jako podíl zkušebního zatížení (kgf) a plochy povrchu vtisku ( $\text{mm}^2$ ) dle rovnice:

$$HV = \frac{\text{Zkušební zatížení (kgf)}}{\text{Plocha povrchu vtisku (mm}^2\text{)}} = \frac{1}{g_n} \cdot \frac{\text{Zkušební zatížení (N)}}{\text{Plocha povrchu vtisku (mm}^2\text{)}} \quad (1.1)$$

Tíhové zrychlení díky gravitaci  $g_n=9,80665 \text{ m/s}^2$  je převodním faktorem z kgf na N.

Dále je rovnice 1.1 rozepsána do rovnice:

$$HV = \frac{1}{g_n} \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} \quad (1.2)$$

Kde:	F	[N]	-	Zkušební zatížení
	$g_n$	$[\text{m/s}^2]$	-	Tíhové zrychlení díky gravitaci
	d	[-]	-	Aritmetický průměr uhlopříček $d_1$ a $d_2$
	$\alpha$	$[\text{°}]$	-	Průměrný úhel mezi protilehlými stranami vrcholu vnikajícího tělesa ve tvaru jehlanu (nominálně $136^\circ$ )

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (1.3)$$

Rovnice 1.2 se dá zjednodušit na rovnici pro rychlý výpočet hodnot HV. Za předpokladu že je použitý nominální úhel indentoru.

### 1. 2. 6 Mechanické požadavky-hodnocení pevnosti v tahu [46] [50]

Na základě normy o 3D tisku 17296-3 je pevnost výtisků v tahu měřena tahovou zkouškou dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Norma obsahuje slovník pojmů a symbolů, popisuje princip zkoušky, jak by měl vypadat zkušební vzorek i způsoby jakými se zkouška vyhodnocuje. Vše je zpracováno dále v této kapitole.

Zkouška spočívá v natahování zkušební vzorku tahovou silou, většinou až do chvíle jeho porušení lomem. Měla by probíhat za pokojové teploty v rozmezí  $10\text{-}35 \text{ °C}$ . Výsledkem je zjištění jedné, nebo více mechanických vlastností.

$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0} \quad (1.4)$$

Kde:	$L_0$	[mm]	-	výchozí délka vzorku
	$S_0$	[mm]	-	výchozí obsah průřezu vzorku
	$k$	[-]	-	proporcionální koeficient

Průřez zkušební vzorku by měl být kruhový, čtvercový, obdélníkový, nebo mít jiný pravidelný tvar. Preferuje se, když platí přímý vztah mezi výchozí délkou vzorku  $L_0$  a výchozím obsahem průřezu vzorku  $S_0$  definovaný rovnicí 1.4, kde proporcionální koeficient  $k$  je mezinárodně adoptován s hodnotou 5,65. Výchozí délka vzorku je definována jako paralelní testovaná část, na které je měřeno prodloužení v jakémkoli čase testu. Je náležitě vyznačena jemným popisem, nakreslenými čarami, nebo děrovacími značkami. Vždy však takovým způsobem, který nemůže zapříčinit vznik lomu.

Obrobený testovací vzorek obsahuje přechodový rádius mezi konci k uchycení a zkušební částí vzorku, kde po zatížení vznikne lom. Tento rádius je specifikován v materiálovém listu, nebo je zvolen podle normy. Pro ploché vzorky s tloušťkou 0,1-3 mm je minimální rádius 20 mm a pro vzorky s tloušťkou 3 mm a více je minimální rádius 12 mm. U plochých vzorků dále platí podmínka, že poměr mezi šířkou vzorku a tloušťkou nepřesáhne 8:1. Všechny zkušební vzorky by měly být obrobeny a připraveny podle požadavků relevantních ISO norem podle konkrétního materiálu.

Výchozí obsah průřezu vzorku  $S_0$  je měřen v minimálně třech místech okolo jeho středu a použita je hodnota odpovídající průměru těchto měření.

Pro proporcionální testovací vzorky platí, že pokud výchozí délka neodpovídá hodnotě  $5,65 \cdot \sqrt{S_0}$ , je značka tažnosti  $A$  doplněna hodnotou proporcionálního koeficientu, který se na vzorku aplikoval.  $A_{11,3}$  značí použití proporcionálního koeficientu s hodnotou 11,3. Pro neproporcionální testovací vzorky je značka tažnosti  $A$  doplněna výchozí délkou vzorku  $L_0$  v milimetrech. Například  $A_{80\text{mm}}$  značí vzorek s výchozí délkou 80 mm.

Vzorek by měl být uchycen v čelistech testovacího stroje tak, aby tahová síla působila co nejvíce rovnoběžně s jeho osou, čímž se minimalizuje ohyb a následné zkreslení výsledků zkoušky. Toto je důležité zejména při zkoušení meze pevnosti materiálu.

Norma dále podrobně popisuje způsoby testování a vyhodnocování testů pro zjišťování jednotlivých mechanických vlastností materiálu.

### 1. 2. 7 Hodnocení makro a mikrostruktury [51]

Makroskopická a mikroskopická struktura se hodnotí dle normy ČSN EN ISO 17639. Ta poskytuje doporučení pro přípravu vzorků, zkušební postupy a jejich záměry.

Makroskopická kontrola je prováděna prostým okem, nebo při malém zvětšení, obecně menším než 50x. Mikroskopická kontrola je prováděna pod mikroskopem při zvětšení 50x až 500x. Obě kontroly jsou prováděny v naleptaném, nebo nenaleptaném stavu.

Touto zkouškou jsou vyhodnocovány struktury (včetně struktur zrn, precipitáty a vměstky, morfologie a orientace) nezávisle a/nebo ve vztahu k případným trhlinám a dutinám. Návod k vyhodnocení charakteristických znaků, které je možné při makroskopických a mikroskopických kontrolách najít, obsahuje tabulka 2.

Tabulka 2: Návod k hodnocení znaků při makro a mikro kontrolách [51]

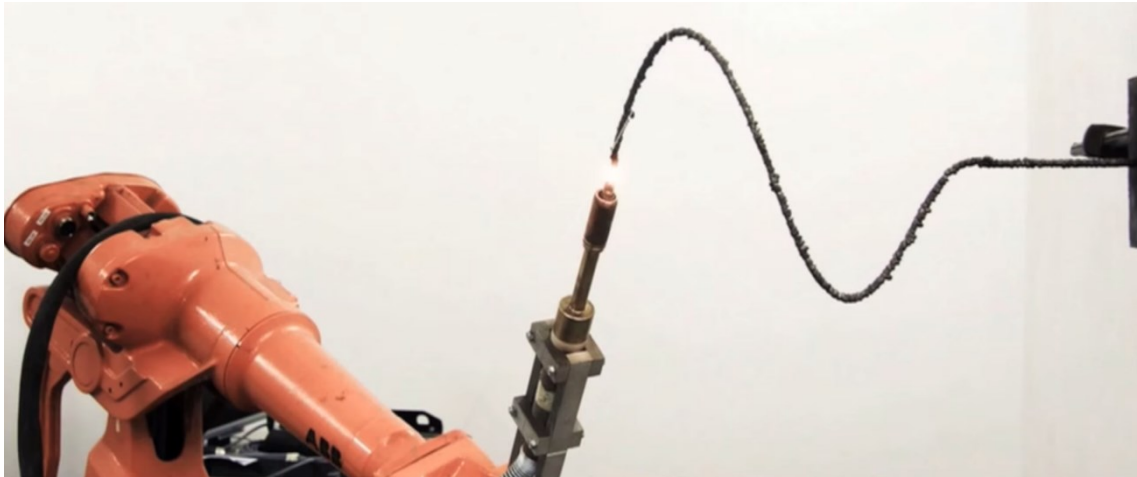
Charakteristické znaky	Makroskopická kontrola bez leptání	Makroskopická kontrola s naleptáním	Mikroskopická kontrola bez leptání	Mikroskopická kontrola s leptáním
Trhliny za tepla	x	x	x	x
Trhliny za studena	x	x	x	x
Lamelární praskání	x	x	x	x
Dutiny	x	x	x	x
Vměstky	x	x	x	x
Studený	x	x	x	x
Geometrický tvar	x	x	-	-
Tepelně ovlivněná zóna	-	x	-	x
Housenky a vrstvy	-	x	-	(x)
Hranice zrna	-	-	(x)	x
Struktura zrna	-	-	-	x
Tuhý roztok	-	x	-	x
Příprava spoje	-	x	x	x
Směr válcování	-	x	-	x
Směr vláknité struktury (zrna)	-	x	-	x
Segregace	-	x	-	x
Precipitace	-	-	-	x
Oprava a neshoda	-	x	(x)	x
Mechanické/tepelné ovlivnění	-	x	-	x

V tabulce je označení „X“ pro charakteristické znaky, které jsou zjištěny, „(X)“ pro znaky, které mohou, ale nemusí být zjištěny a „-“ pro znaky které nelze zjistit.

Vzorek musí být ke kontrole náležitě připraven zalitím, řezáním, broušením a/nebo leštěním, a/nebo leptáním, na základě vhodnosti a podle normy ISO/TR 16060. Těmito procesy však nesmí být povrch nijak ovlivněn. V normě 16060 jsou také podrobně popsány způsoby konečné úpravy vzorku, metody leptání a leptadla samotná. Pro různé materiály a účely kontroly jsou totiž potřebné jiné postupy, leptadla a jejich koncentrace, časy leptání, teplota atd.

## 2 TEORIE SVAŘOVÁNÍ A 3D TISKU [13] [14] [15] [16] [17] [52]

Zvládnutí svařování a následně 3D tisku kovů, jako na obrázku 12, je závislé na širokých znalostech mnoha oborů. Matematika, chemie, fyzika, metalurgie, nauka o materiálu, fyzika kovů a další dávají svařování interdisciplinární charakter. Vysvětlení základních pojmů svařování pomůže další orientaci.



Obr. 12: 3D tisk kovu pomocí robota [52]

Svařování je v technologické praxi definováno jako spojení dvou, nebo více různých součástí nerozebíratelným spojem. Přičemž je nutné, aby vzniklý spoj vykazoval požadované vlastnosti a vyhovoval podmínkám provozu součástí.

Svařováním kovů a jejich slitin vzniká nerozebíratelný spoj pomocí soustředěného tepla, nebo tlaku. Spojení vzniká působením meziatomových sil díky vazbám na teplem nebo tlakem aktivovaných plochách. Ty jsou v oblasti svaru v plastickém nebo roztaveném stavu.

Různé pevné látky se vyznačují různými typy meziatomových vazeb, které odpovídají různému uspořádání iontů a elektronů. Ionty jsou uspořádány tak, aby měl krystal co nejmenší potenciální energii. Kovové krystaly mají kovovou vazbu. Základem je představa existence mraku volných neboli valenčních elektronů, které volně přechází od atomu k atomu. K vzniku kovové vazby dochází, když přitažlivé síly mezi kovovými ionty a elektronovým mrakem převyšují vzájemné odpuzování elektronů v mraku. Pro překonání této bariéry potenciální energie soustavy atomů v povrchových vrstvách dochází díky dodání potřebné (aktivační) energie. Podmínkou je fyzikální kontakt součástí, tedy přiblížení svařovaných ploch na vzdálenost potřebnou k uplatnění výše zmíněných interakcí.

Je-li proces vzájemného styku dvou částí kovu doprovázen procesy difúze, tedy mechanismem přemístování částic, dochází ke vzniku nových krystalických zrn. Původní styková plocha zmizí a vlastnosti spoje se velmi přibližují vlastnostem výchozích dílů. K tomuto dochází zejména při tavném svařování, kdy je natavován přídavný materiál a zároveň materiál základní (svařovaný). Dojde tak ke snadnému promísení pomocí difúze.

### 2.1 Tepelně ovlivněná oblast [15] [21]

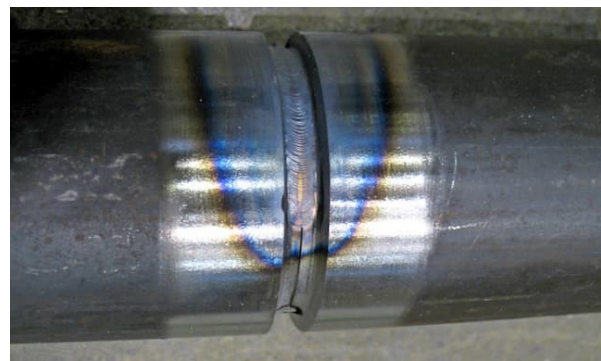
Při svařování dochází k ohřevu větší části základního materiálu, která je označována jako teplotní pole. Je časově i místně proměnné a je možné jej schematicky zobrazit pomocí izotermických čar. Při tavném svařování bodovým zdrojem mají izotermy přibližně tvar elipsy a spojitě definují pole od teplot tavení do teploty okolí. Velikost a tvar teplotního pole jsou ovlivňovány mnoha faktory. Především rozměrem a vlastnostmi základního materiálu, tepelným výkonem zdroje a rychlostí svařování. Obecně je teplotní pole tím větší, čím vyšší je celkové vnesené teplo a větší tepelná vodivost materiálu. Vnesené teplo se zvyšuje společně

s vyššími hodnotami proudu, napětí a účinnosti přenosu tepla obloukem (u MIG/MAG svařování je účinnost  $\eta = 0,8$ ) a snižuje s rostoucí rychlostí svařování, podle vzorce:

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} \quad (2.1)$$

Kde:	Q	[kJ·mm <sup>-1</sup> ]	-	vnesené teplo
	$\eta$	[-]	-	tepelná účinnost přenosu tepla
	U	[V]	-	proud
	I	[A]	-	napětí
	v	[mm·s <sup>-1</sup> ]	-	rychlost svařování

Oblast teplotního pole, ve kterém může být dosaženo teplot překrytí se nazývá TOO-tepelně ovlivněná oblast. V ní dochází u oceli k transformaci železa a vytvoření několika pásem s různou strukturní stavbou a různými velikostmi zrn. Změny v materiálu lze rozeznat i okem, jak je vidět na obrázku 13.

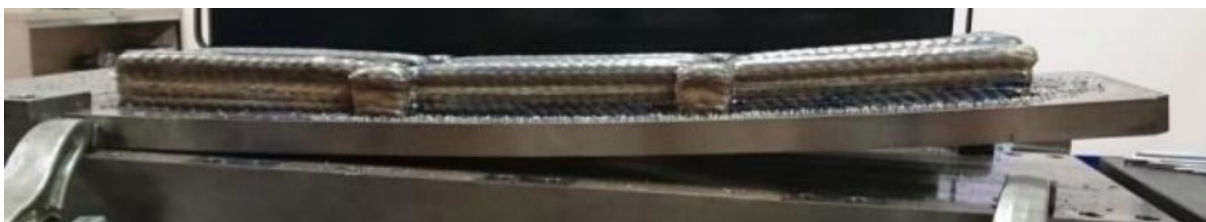


Obr. 13: Ukázka TOO po svaření trubky [21]

Ohřevem vyvolané teplotní změny při svařování jsou vždy doprovázeny délkovými změnami způsobené teplotní roztažností materiálu. U svařování dochází k ohřevu materiálu pouze lokálně a změnám délky brání studnější základní materiál. Tento teplotní rozdíl vyvolává tepelné pnutí, jejíž hodnota může snadno překročit mez kluzu. V blízkém okolí svaru tak dochází k rozsáhlé plastické deformaci, jelikož při vysokých teplotách je materiál pýchován i účinkem relativně malých napětí (klesají hodnoty meze kluzu  $R_e$  a meze pevnosti  $R_m$ ).

## 2. 2 Zbytková napětí [13] [16] [53]

Během chladnutí je materiál smršťován a zároveň roste jeho pevnost. Ve svarovém spoji tak zůstanou značná zbytková napětí, která v konečné fázi mohou dosáhnout až meze kluzu materiálu. To vede k plastickým deformacím a změně tvaru a rozměru svařence. Deformace se rozděluje na podélné, příčné a úhlové. U dlouhých svarů a velkých průřezů svarové housenky (naneseného přídavného materiálu) se nejvíce projevuje podélná deformace. Šířka teplotního pole nejvíce ovlivňuje příčné deformace. Nesymetrický průřez svaru, nebo kladení housenek na sebe způsobuje úhlové deformace jak můžeme vidět na obrázku 14. To bude hrát největší roli u aditivní výroby.



Obr. 14: Ohyb součásti vytisknuté pomocí WAAM [53]

V případě 3D tisku je potřeba sledovat teplotu interpass, která udává maximální teplotu materiálu před nanášením další vrstvy. Měří se přímo ve svaru, nebo jeho těsné blízkosti na

základním materiálu. Obvykle je uváděna maximální teplota, která zpravidla nepřesahuje teplotu přehřevu.

Zbytkové pnutí ve výtisku, je možné odstranit pooperačním žiháním ke snížení vnitřních pnutí (obecně post-processing). Tepelným zpracováním je ovlivněna mikrostruktura, vlastnosti i provozní spolehlivost výtisku. Ohřev se provádí většinou v odporově vytápěné peci na požadovanou teplotu, požadovanou rychlostí a obdobně je i ochlazováno. Výsledkem je prohrátí celé součásti, dochází k relaxačním a difuzním procesům, což vede k požadovanému snížení pnutí.

## 2. 3 Svařitelnost [13]

Jedním z hlavních určujících faktorů pro 3D tisk kovů bude jejich svařitelnost. Ta je definována jako komplexní charakteristika vyjadřující vhodnost materiálu k tvorbě svarového spoje požadovaných mechanických, chemických a fyzikálních vlastností. Nejvíce je svařitelnost ovlivňována chemickým složením materiálu. U 3D tisku primárně přídavného materiálu, protože podstatou je pokládání svarových housenek na sebe. Změnou obsahu jednotlivých prvků se výrazně mění mez kluzu a mez pevnosti svarového kovu, což následně ovlivňuje stabilitu svařence.

### 2. 3. 1 Prvky ovlivňující svařitelnost [13] [16]

Při obsah uhlíku do 0,25 hm. % je ocel vhodná ke svařování. U vyšších obsahů je svařitelnost obtížná, protože po zchladnutí vznikají nežádoucí struktury, zejména vysoký podíl martenzitu. Avšak je proveditelná při použití vhodné teploty přehřevu. Omezí se vznik martenzitu.

Při obsahu křemíku do 0,1 hm. % je ocel neuklidněná. Vhodně je obsah pod 0,8 hm. %. V nelegovaných uhlíkových ocelích má vyšší obsah křemíku vliv na pevnost feritu a působí desoxidačně.

Mangan také působí desoxidačně, zvyšuje mez kluzu i pevnosti, aniž by došlo ke snížení plasticity. U nelegovaných uhlíkových ocelí je jeho obsah 0,3 – 1,7 hm. %.

Kvůli fosforu může dojít ke zkřehnutí svaru za studena. Jeho množství se omezuje na maximálně 0,03 hm. %. Fosfor také zvyšuje mez kluzu i pevnosti.

Síra zvyšuje náchylnost k vzniku horkých trhlin. Zlepšuje však obrobiteľnosť. U nelegovaných ocelí se doporučuje maximálně 0,03 hm. %

Dusík zapříčiňuje vznik nitridů ve svaru. Ty mají za následek zvýšení meze kluzu, meze pevnosti i tvrdosti materiálu a zároveň snížení tažnosti, vrubové houževnatosti i meze únavy. Dusík způsobuje stárnutí ocelí a křehkost v rozmezí teplot 100 – 300 °C.

Vodík je nežádoucí příměsí jak přídavného materiálu (vlhkost na drátu, obalu elektrody) tak základních materiálů na kterých ulpívá po povrchových úpravách (zbytky maziv, barev, nebo vodík absorbovaný při moření). Důsledkem přítomnosti vodíku ve svaru je tvorba pórů, oduhličování svarového kovu a vznik trhlin ve svaru i TOO.

### 2. 3. 2 Uhlíkový ekvivalent [16] [17]

Celkovým vypovídajícím faktorem svařitelnosti je uhlíkový ekvivalent, podle nějž je možno informativně určit svařitelnost všech druhů ocelí nelegovaných i legovaných. Ukazuje vliv jednotlivých prvků oceli na její kalitelnost. Při kalení dochází ke vzniku křehkých struktur (spodní bainit, martenzit) v TOO i svaru. Čím vyšší je uhlíkový ekvivalent tím horší je svařitelnost dané oceli. Výpočet je možno provést dle vztahu:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024t \quad (2.2)$$

Kde:  $C_e$  [%] - uhlíkový ekvivalent  
 $t$  [mm] - tloušťka plechu

Pro oceli s obsahem uhlíku  $C < 0,22 \%$  a uhlíkovým ekvivalentem  $C_e < 0,50 \%$  není nutné provádět přehřev materiálu. Zároveň je zaručena svařitelnost, tedy ani u 3D tisku z tohoto materiálu nehrozí vznik horkých ani studených trhlin.

Pro 3D tisk by bylo nejvhodnější simulovat celý teplotní proces pomocí metody konečných prvků (MKP) v příslušných softwarech. To je však velmi náročné po programátorské stránce a v důsledku toho i té finanční.

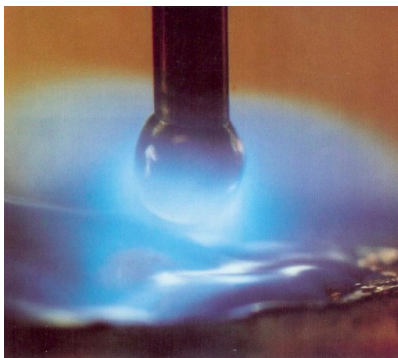
## 2. 4 Přenos kovu [56] [57]

Způsob, jakým je přenášén kov při procesu svařování je ovlivněn mnoha faktory, především velikostí použitého proudu a napětí, ochranný plyn a přídavný materiál. Svou roli hrají i gravitace, povrchové napětí, elektromagnetické síly a viskozita kapky. Základní přenosy kovu jsou zkratový, sprchový a impulsní.

Při středních hodnotách svařovacího proudu (60-180A), dochází ke zkratovému přenosu v krátkém oblouku (viz obr. 15). Kapky kovu, které se oddělují z elektrody způsobují zkrat oblouku při doteku kapky s tavnou lázní.

Sprchového přenosu v dlouhém oblouku (viz obr. 16) je dosaženo díky vyššímu proudu (200-500A) a snadné ionizaci plynu díky čemuž obklopuje plazma i konec elektrody a tím se urychluje ohřev drátu. Elektromagnetickým účinkem se poté tvoří malé kapky urychlené ve vysoké frekvenci (150-350Hz) směrem do svarové lázně.

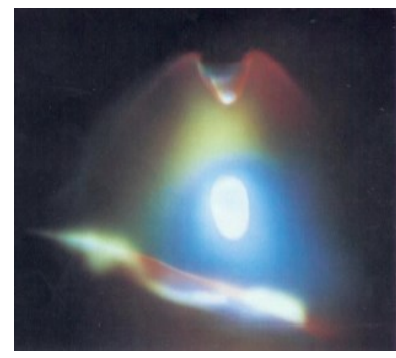
Impulsní přenos (viz obr. 17) využívá menší hodnoty proudu (okolo 40A), která udržuje zapálený oblouk po celou dobu procesu. K uvolnění každé kapky je proud zvýšen na úroveň mezi zkratovým a sprchovým přenosem. Pulsy proudu jsou řízeny elektronicky s frekvencí 25-500Hz. Průběh pulsů se dá prakticky libovolně měnit, aby bylo dosaženo ideálního stavu pro daný materiál.



Obr. 16: Zkratový přenos kovu [56]



Obr. 16: Sprchový přenos kovu [56]



Obr. 157: Impulsní přenos kovu [56]



### 3 DIRECT ENERGY DEPOSITION [3] [12]

Princip DED metod spočívá v ukládání návarových housenek vedle sebe a na sebe. Po trajektorii budoucího obrysu součásti (od spodu nahoru) jsou na sebe nanášeny jednotlivé vrstvy postupným navařováním. Tloušťka návarové „stěny“ může být konstantní nebo adaptivní. Přesný model geometrie housenek (respektive vrstev tvořených překrývajícími se housenkami) je hlavní podmínkou pro dosažení rozměrové přesnosti a povrchové kvality vyrobených produktů. Výška jedné vrstvy je v rozmezí 1-2 mm z čehož vyplývá povrchová drsnost (vlnovitost) přibližně 500  $\mu\text{m}$  pro jednořadé nanášení. Výtisk nedosahuje přesnosti součásti a je tedy nutné jej obrobit. Je vhodný pro součásti s malou až střední komplexností a střední nebo větší velikosti.

Pro DED se adaptují klasické (MIG/MAG, TIG) i pokročilé (laser, elektronový paprsek) nástroje pro svařování s přídavným materiálem ve formě drátu, nebo prášku. Přídavný materiál ve formě prášku je používán převážně v kombinaci s laserovou hlavou pod názvem Laser Metal Deposition. Dále se práce dle zadání zaměřuje pouze na technologie kombinované s přídavným materiálem ve formě drátu. Vysoká rychlost nanášení, nízké náklady na materiál (drát) a vybavení (u klasických nástrojů) a dobrá strukturální integrita dělají z DED vhodného kandidáta pro náhradu klasických metod výroby obráběním nebo kování velkých, jednoduchých až středně komplexních výrobků. Vznikají tak 3D komponenty různých, z pohledu AM, jednoduchých geometrických tvarů. Odlehčené duté profily, nebo rotační součásti s výztuhami, které jsou jinými technologiemi nevyrobitelné, nebo vyrobitelné značně neekonomickým způsobem.

Pro kvalitní využití DED je potřeba skloubit technologické parametry procesu svařování s robotickým programováním. Také termální analýza procesu hraje významnou roli při dosahování požadovaných mechanických vlastností výtisku. Pro každý nový výrobek, nebo materiál je potřeba téměř od nuly odladit celý proces tisku.

Výhodou oproti jiným metodám je podstatně větší pracovní plocha, tedy i výsledný díl, protože zde není omezení velikostí pracovní komory (jako je tomu u PBF metod). Celý proces je zapotřebí automatizovat s použitím univerzálních robotických pracovišť (viz obr. 18), které mají pracovní dosah výrazně větší. Svařovací hořák je možno upevnit buď na robotický systém, nebo na počítačem řízený portál. Je tedy možno zamýšlet masivní konstrukce (10 kilogramů a víc) jako například velké části mostu.



Obr. 17: šesti-osý robot (vlevo) a centrum pro svařování třením (vpravo) [12]

Výhodou metody je možnost použití všech svařitelných materiálů jako konstrukčních i vysokolegovaných ocelí, hliník, nikl, titan, měď a jejich slitiny. Navíc lze tvořit výrobky svařené z několika druhů materiálů. U speciálních materiálů je někdy dobré upravit tepelný

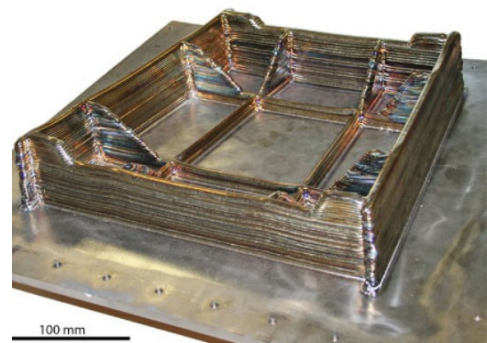
režim svařování a předepsat teplotu interpass mezi nanášením jednotlivých vrstev návaru. Je i možnost zařazení speciálního režimu „válcování“ navařených vrstev.

Aditivně vyrobený materiál Ti-6Al-4V vykazuje vysokou odolnost proti opotřebení. Zejména vysokocyklová únava může být řádově vyšší než u tvářené slitiny. Nicméně Ti-6Al-4V je ovlivňován vysokou anizotropií pevnosti v tahu a tažností. Díky charakteristikám jeho tuhnutí vznikají primárně sloupcové  $\beta$  zrna a vysoce texturová mikrostruktura. To vede k vyšší pevnosti ve směru rovnoběžném s nanášenými vrstvami, naopak prodloužení je vyšší v kolmém směru. Zmírnit tento problém je možné válcování (ve směru příčném i kolmém na vrstvu) po nanesení každé vrstvy, které deformuje výtisk pomocí vertikální síly. Ve výtisku potom krystalizují  $\beta$  i  $\alpha$  fáze, což vede k izotropním mechanickým vlastnostem. Takto zpracovaný materiál má mez kluzu 994 MPa, mez pevnosti 1078 MPa a tažnost 13 %, což je lepší než u kované součásti, která dosahuje meze kluzu 950 MPa, meze pevnosti 1034 MPa a 12 % tažnost. Zároveň aditivně vyrobená součást nepodléhá podmínkám tuhnutí, spíše závisí na mechanickém procesu během nanášení.

Aditivní výroba hliníku je ovlivněna porozitou. Bylo zjištěno, že při použití kvalitního drátu a určitého synergického svařecího módu, může být porozita eliminována. Zejména při použití Fronius CMT v jeho variantě Pulse Advanced, kdy je menší vnesené teplo, což zapříčiňuje vznik dokonale vyrovnaných zrn a oxidického čištění drátu i substrátu.

Dále byly úspěšně vytisknuty materiály jako ocel, invar (36 % Ni + 64 % Fe), mosaz, měď nikl. U všech materiálů se výzkum a vývoj zaměřuje na garanci mechanických vlastností a eliminaci defektů jako je porozita.

Existuje mnoho problémů s kterými se musíme při 3D tisku kovů vypořádat. Hlavním z nich je zbytkové napětí vytvořené velkým vneseným teplem při obloukovém svařování. Největších hodnot nabývá podél směru nanášených vrstev v první nanesené vrstvě a po odepnutí může způsobit zkroucení celé součásti. Elegantním řešením může být symetrické nanášení, kdy se proti sobě působící zbytková napětí vyruší. Příkladem je sestava součásti vnějšího podvozku na obrázku 19. Navíc je zde také výhoda lepšího teplotního managementu, protože natisknutá vrstva chladne, zatímco je nanášena vrstva na protější straně základní desky. Nevýhodou může být nutnost redesignu součásti například z C tvaru na I tvar. Dalším řešením zbytkových napětí může být tisk na obě strany základní desky (viz obr. 20), kde nemusíme výrobek redesignovat a navíc vyrobíme dvě součásti zároveň. Vhodnou orientací budoucího výrobku můžeme docílit tisku kratších stěn, což může pomoci snížení zbytkového



Obr. 18: Součást podvozku [12]



Obr. 19: Nosník křídla [12]

napětí a zabránit zkroucení. Vysokotlaké válcování mezi jednotlivými vrstvami silou 50kN může snížit zbytkové napětí aditivně vyrobené součásti z oceli z 600MPa až na 300MPa. Zkroucení se však samotným vysokotlakým válcováním zcela neeliminuje. Jsou zkoumány další strategie jak dosáhnout celkové eliminaci zbytkového napětí.

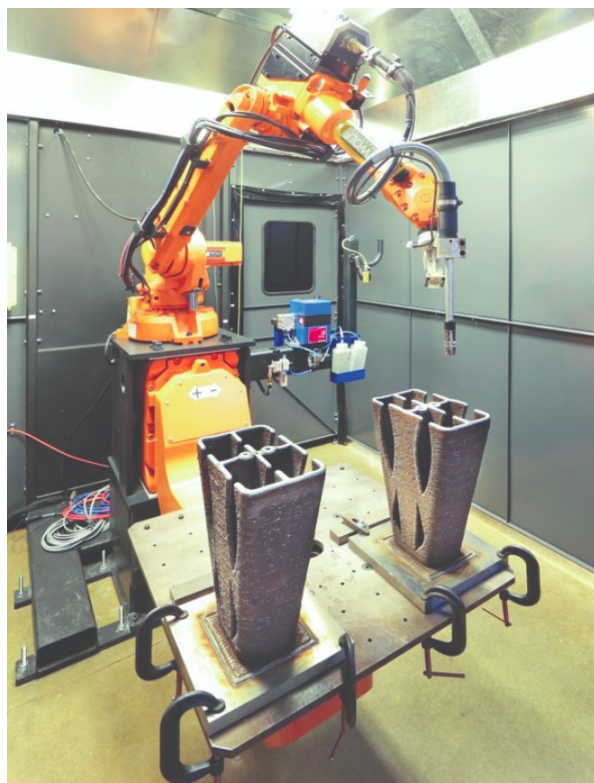
### 3.1 WAAM [3] [12] [28] [31] [54]

Kombinace elektrického oblouku jako tepelného zdroje a drátu jako materiálu je nazvaná Wire+Arc Additive Manufacturing (WAAM) a je zkoumána jako technologie 3D tisku od roku 1990 ve kterém vznikla na univerzitě Cranfield, United Kingdom. Jako hardware pro WAAM jsou využívány klasické svařecí nástroje: zdroj, svařovací hlava a podavače drátu. Pohyb je zajišťován pomocí robota, portálu, nebo Computer Numerical Control (CNC) stroje.

Základní sestava (viz obr. 21) pro aditivní výrobu obsahující robota, zdroj, hořák a upínací nástroje je vhodná pro tisk oceli a hliníku. Pro titan nanášený v ochranné inertní atmosféře je nutno dále pořídit svařecí schránku, která chrání svar před oxidací. Lze však použít téměř jakýchkoli kombinací robota, zdroje a hořáku za předpokladu nahrání WAAM softwaru. Ten kontroluje proces a je možné jej specifikovat na různé aplikace. Sám software nabízí vhodné nanášečí parametry, ale je možné je přenastavit podle potřeby, nebo zkušeností. Velikost vyráběné součásti je u oceli a hliníku omezena pouze pracovním dosahem manipulátoru. U titanu může být limitující velikost schránky ve které je inertní atmosféra, nutná pro tisk titanu. Vysoká nanášečí rychlost je důležitá pro výtisk velkých součástí v rozumném čase. S hodnotami mezi 1 kg/h (při použití TIG) a 4 kg/h (při použití MIG/MAG) pro hliník a oceli je možné vyrobit většinu součástí za jeden den. Při využití MIG/MAG je možné dosáhnout vyšších rychlostí nánosu, až 10 kg/h, to však narušuje přesnost tisku zvýšeným projevem nedostatků metod MIG/MAG. Těmi jsou nižší stabilita oblouku, rozstřík během tvorby návaru i zvýšená porozita. Uvedené problémy se firmy snaží řešit modifikací technologií MIG/MAG, které zapříčiní snížení příkonu a vneseného tepla, bezroztříkový charakter svařování a celkově vysokou kvalitu návaru. Při rychlosti nánosu 10 kg/h může být BTF poměr až 1:10. Při středně rychlém nánosu (1 kg/h u titanu a hliníku, 3 kg/h u oceli) je poměr BTF menší než 1:1,5, což maximalizuje úspory materiálu.

Cena základního materiálu, drátu, se pohybuje u oceli mezi 50 Kč/kg a 350 Kč/kg, u hliníku 150 Kč/kg a 2400 Kč/kg, u Ti-6Al-4V mezi 2400 Kč/kg a 6000 Kč/kg. Cena drátů se odvíjí od jeho průměru a složení slitiny. Dráty se také nepotýkají s problémy jako velikost částic, nebo distribuce které ovlivňují tisk s použitím prášku. Při pohledu na samotné nanášení je drát zcela roztaven a stává se součástí výsledné součástky, je tak malá pravděpodobnost kontaminace oproti prášku.

Pro kvalifikaci WAAM pro aplikace komponentů do průmyslu je nutné vyvíjet nedestruktivní metody zkoušení (NDT – Non-Destructive Testing) a metody monitorující proces výroby v reálném čase (OLM – Online Monitoring). S ohledem na NDT je nutné měřit tvar součástí, porozitu a velikost zrna během nanášení vrstev. Tvar se musí měřit aby bylo zaručeno že se každá vrstva nanese v souladu s trajektorií nástroje, která byla vytvořena ve sliceru z CAD předlohy. Taky se díky tomu zjistí, když se vyskytnou neočekávaná zkroucení způsobená zbytkovým napětím. Porozita se objevuje při použití nekvalitního drátu, nebo při



Obr. 20: Pracoviště pro WAAM [54]

špatném zacházení s ním. Identifikace porozity při procesu nanášení umožní její okamžité odstranění například obráběním. Prostorově řešená akustická spektroskopie je nekontaktní a nedestruktivní zkouška založená na povrchových akustických vlnách, které jsou vyvolány laserem a následně detekovány. Ze zjištěných rychlostí vln se následně mapuje mikrostruktura polykrystalického materiálu.

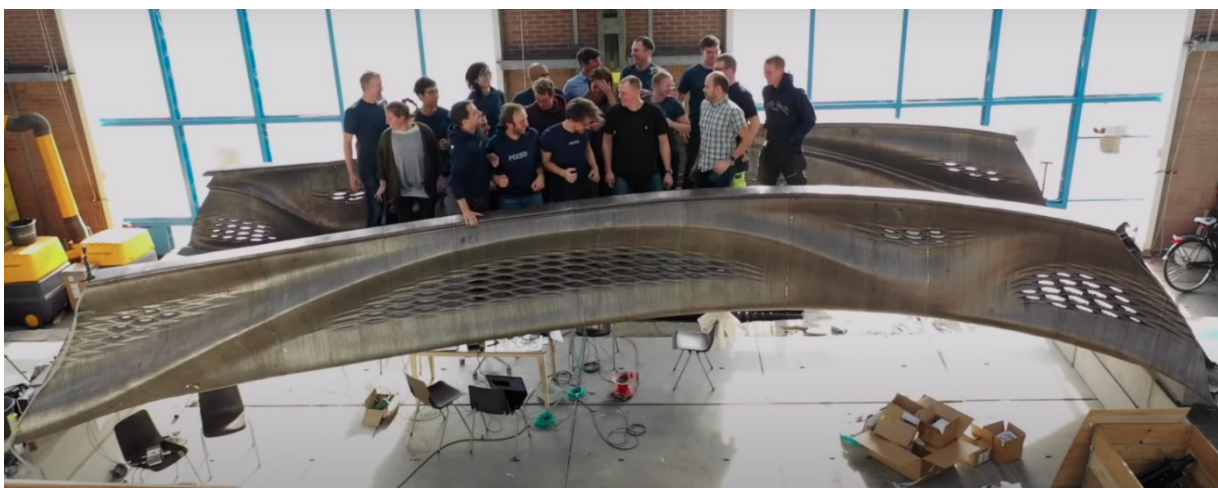
OLM zaznamenávají parametry oblouku, rychlost hlavy, rychlost podávání drátu, teplotní parametry atp. Z kvalitativního hlediska je možné díky těmto parametrům zjistit příčiny problémů během tisku. Odchytky způsobují neočekávané změny geometrie nanášeného materiálu jak výšky, tak šířky. Pro reprodukci výroby CAD součástí do reálného výtisku je žádoucí co nej přesněji dodržovat tyto procesní podmínky.

Spolupráce mezi RAMLAB (Rotterdam Additive Manufacturing LAB), Promarin, Autodesk, Boreau Veritas a Damen dala vzniknout prvnímu certifikovanému lodnímu šroubu vyrobeného metodou WAAM, který můžeme vidět na obrázku 22. Dva vyrobené kusy, každý vážící 400kg byly úspěšně otestovány na lodi Stan Tug 1606.

Technologický tvůrce MX3D sídlící v Amsterdamu vytiskl pomocí WAAM spojovací konstrukční prvky pro střešní konstrukci, lavičku do parku, café bar, robotické rameno (o 50 % lehčí než původní) a chytrý most, který je umístěn v Amsterdamu. Chytrý most (viz obr. 23) má v sobě zabudované senzory, které jej v reálném čase monitorují, sledují jeho aktivitu, analyzují jeho reakce na vnější vlivy a případné poškození. Několik světových společností, včetně Arcelor Mittal, Autodesk, Lenovo, ABB, TU Delft spolupracovaly na vytvoření tohoto 12 metrů dlouhého mostu, který byl dokončen v roce 2019. MX3D jej považuje za předvedení potenciálních aplikací svých multiosých 3D tiskových technologií.

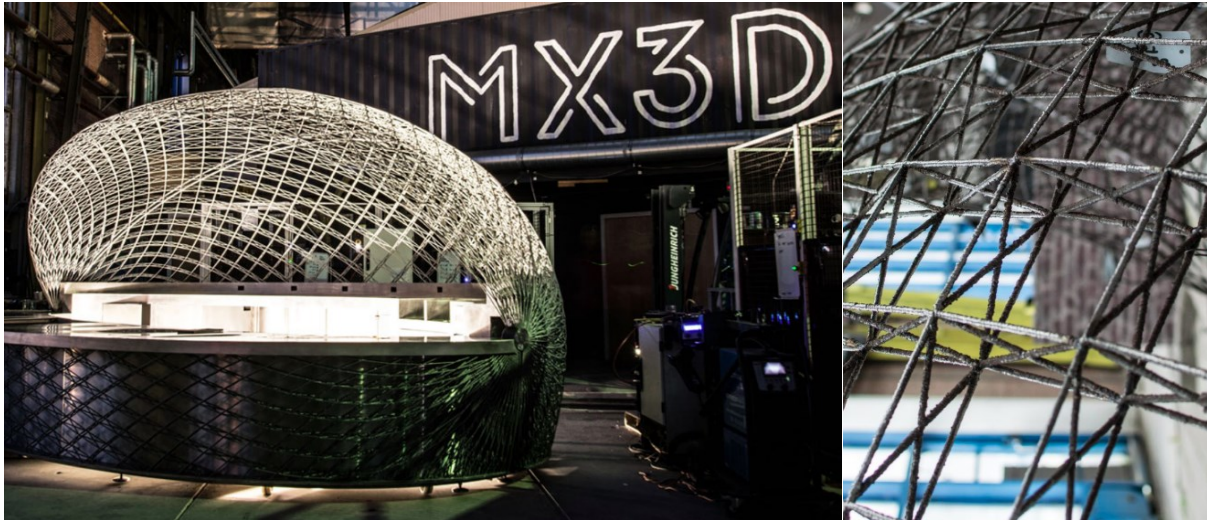


Obr. 21: Lodní šroub vyrobený pomocí WAAM [28]



Obr. 22: Most vytisknutý pomocí WAAM [31]

Umělečtější výtisk je café a sendvičový bar, vyrobený pro muzeum umění Pérez v Miami, který lze vidět na obrázku 24 společně s vystřiženým detailem zaměřeným na reprezentaci geometrie výtisku.



Obr. 23: Večerní bar a detail konstrukce [31]

### 3. 1. 1 Metal Inert Gas/Metal Active Gas [13] [18] [24] [55] [56]

Jedná se o metodu obloukového svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře. Ta je tvořena aktivním plynem u MAG, nebo inertním plynem u MIG, což je hlavní rozdíl těchto dvou metod. MIG i MAG jsou založeny na hoření oblouku mezi tavenou elektrodou (přidávným materiálem ve formě drátu) a základním materiálem.

Drát je ve svařovacím hořáku napájen elektrickým proudem pomocí kontaktního průvlastku, co nejbližší jeho konci, aby byla délka elektricky zatíženého drátu co nejmenší. Doprava drátu ze zásobníku do místa svaru je zprostředkována mechanickým podavačem. Ten je zabudován přímo v hořáku, nebo je součástí zdroje. Kombinací obou způsobů je systém push-pull, který umožní podávání drátu skrz kabel na vzdálenost až 10 metrů.

Svařovací hořák zároveň dodává do okolí svaru ochranný plyn skrz plynovou trysku. Při nízkém pracovním příkonu jsou hořáky chlazeny ochranným plynem. Při vyšších výkonech je potřeba chladit hořák proudící kapalinou v uzavřeném okruhu (např. destilovanou vodou).

Teplota kovových kapek se při MAG svařování pohybuje mezi 1700 až 2500 °C. Teplota tavné lázně je v závislosti na technologii, chemickém složení, parametrech svařování a vlastnostech materiálu v rozmezí 1600 až 2100 °C.

Zdroje jsou používány se stejnosměrným výstupem. Kladný pól je připojen k drátové elektrodě. Používají se převážně invertory s různými výkonovými vlastnostmi. Zdroje pro MIG/MAG svařování mají plochou, statickou charakteristiku. Konstantního napětí je dosaženo díky samoregulační schopnosti udržování konstantní délky oblouku. Regulace je způsobena výraznou změnou proudu při relativně malých změnách délky oblouku, čímž se mění i napětí na oblouku. Regulace délky oblouku je možná pouze při konstantí rychlosti podávání drátu. Změnou délky oblouku se změní i napětí a podle pohybu pracovního bodu statické charakteristiky se změní i proud. Při větší délce oblouku je snížen proud i rychlost tavení elektrody a tím se elektroda začne přibližovat ke svaru a oblouk je tak zkrácen. Naopak při menší délce oblouku je sníženo napětí, zvýšena intenzita proudu a tavení elektrody je rychlejší. Tím je délka oblouku opět zvětšena. U reálného procesu svařování (navarování) je takto docíleno oscilace kolem nastavené „rovnovážné“ hodnoty proudu, napětí a délky oblouku.

Pro 3D tisku bude žádoucí mít moderní digitální svařovací zdroj (viz obr. 25) vybavený řídicí elektronickou jednotkou, která digitalizuje veškeré procesy svařování. Tento centrální mikropočítač uskutečňuje díky své datové sběrnici komunikaci mezi svařovacím zdrojem a dalšími komponenty (podavač drátu, přívod ochranného plynu atd.). Všechny informace jsou zpracovávány a na základě jejich vyhodnocení jsou měněny provozní data, nebo nastavení parametrů svařování nejen na zdroji, ale taky na podavači drátu, nebo přímo v hořáku. Při svařování dochází během každé sekundy k až 10.000 řídicím a regulačním krokům. V každém jsou porovnávány skutečné svářecí parametry se zadanými. Při zjištění odchylky jsou parametry okamžitě korigovány dle zadaných hodnot. Zároveň je v reálném čase kontrolováno síťové napětí, posuv svařovacího drátu, proud plynu a další podstatné funkce.



Obr. 24: Různé svařovací zdroje [55]

Ochranné plyny mají významnou úlohu v procesu svařování. Chrání svar, oblouk a elektrodu před přístupem vzduchu, který by jinak způsobil oxidaci, naplynění, pórovitost nebo propal prvků. Svým složením a množstvím ovlivňují mnohé charakteristiky svařování. Vytváří ionizované prostředí pro start a hoření oblouku. Ovlivňují metalurgické děje při tvorbě kapky a ve svarové lázni. Korigují síly působící v oblouku, jeho tvar a rozměry. Mění tvar a rozměry průřezu svaru. Mají vliv na přenos kovu obloukem, tvar a rozměr kapky a rychlost jejího přenosu obloukem. Ovlivňují celkovou kvalitu a mechanické vlastnosti návaru.

Jsou používány jednosložkové i vícesložkové ochranné plyny. Dělí se podle svých účinků ve svaru na inertní (Ar, He), oxidační ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ), redukční ( $\text{H}_2$ ) a nereagující ( $\text{N}_2$ ). Běžně je používán argon s příměsí oxidu uhličitého. Argon jako inertní jednoatomový plyn netvoří žádné chemické vazby, tedy nijak svarový kov neovlivňuje, pouze jej chrání před vnější atmosférou. Příměsový oxid uhličitý výrazně stabilizuje proces MAG, díky zlepšení elektronové emise, stabilitě katodové skvrny a lepší zajištění lepší smáčenlivosti povrchu.

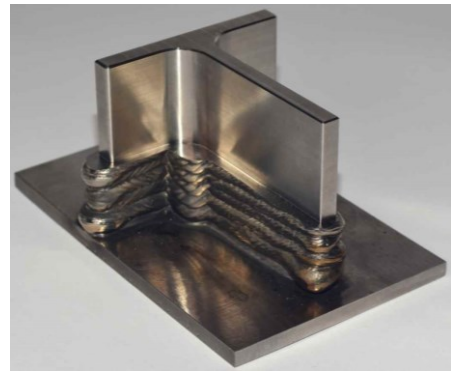
Obecně se současný výzkum obloukového svařování zaměřuje dvěma směry. První se snaží o co nejvýkonnější a nejproduktivnější způsoby svařování materiálů s větší tloušťkou a zaručení dokonalých průvarů koutových i tupých svarů. Druhý směr většinou cílí k dosažení minimálního vneseného tepla, což platí i pro výzkum technologie 3D tisku. Toho je dosaženo různými modifikacemi metod MIG/MAG, které celkově umožňují kvalitnější navaření vrstev s lepší výslednou strukturou a vlastnostmi.

Stabilní svařovací proces a efektivní rozptýlení tepla jsou stěžejní pro WAAM. Svařovací proces musí vnášet do svaru co nejméně energie, aby se první vrstva neroztavila při nanášení druhé. Jinými slovy musí být proces tak „studený“ jak jen je to možné.

Firma Fronius vyvinula proces Cold Metal Transfer (CMT), který je optimalizovaný pro WAAM. Dosahuje vysokých nanosových rychlostí a minima vneseného tepla. Modifikovaný proces CMT Cycle Step redukuje sílu oblouku ještě víc díky deaktivaci oblouku v procesní fázi. Nanosové rychlosti jsou však nižší než u klasického CMT, právě kvůli studenějšímu přenosu. Další použitou modifikací pro 3D tisk je CMT Advanced.

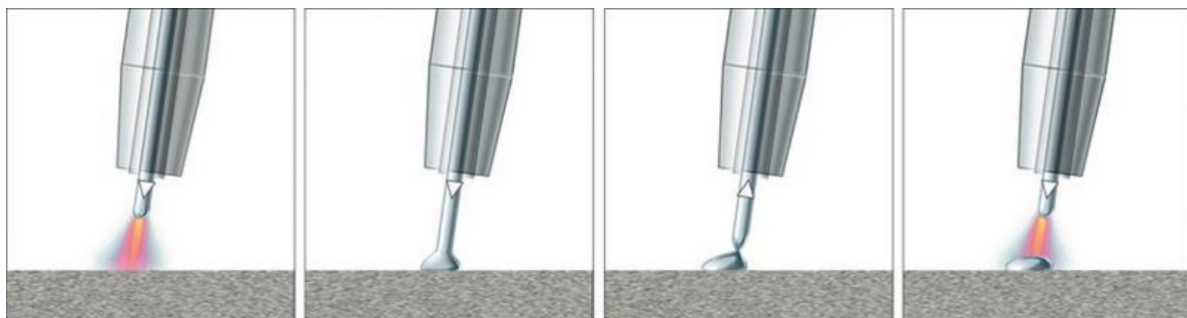
### 3. 1. 2 Cold metal transfer [19] [20] [24] [26] [27] [29] [33]

Metoda CMT je modifikací metod MIG/MAG a samotná má spoustu svých dalších modifikací (CMT advanced, CMT Twin, CMT Pin, CMT Braze+, CMT Cycle Step). Jedná se o princip „studeného“ přenosu drátu který je výsledkem digitálně řízeného krátkého oblouku a obousměrného pohybu drátu. Hlavním přínosem pro nanášení 3D struktur je minimalizované vnesené teplo do návarových housenek, velmi stabilní oblouk a minimální rozstřík. Na obrázku 26 můžeme vidět vytisknutou součást, již z části obrobenu. Digitální kontrola procesu detekuje krátký oblouk a poté pomůže oddělit kapku pomocí zpětného chodu (zatažení) drátu. Během navařování je drát posouván vpřed do svaru a zatahován zpět pokaždé když dojde ke zkratu. Tento princip dopředného a zpětného posuvu drátu je aplikován s frekvencí až 90 Hz. Výsledkem je ohřev pouze po dobu nezbytně nutnou k natavení kapky. Krátký oblouk je kontrolován a proud je udržován v nízkých hodnotách, což přispívá bezroztříkovému přenosu materiálu.



Obr. 25: Příklad 3D výtisku [24]

Proces CMT je od běžného krátkého oblouku odlišen dvěma podstatnými znaky. Vůbec poprvé při něm došlo k přímému zapojení pohybu drátu do řízení svařovacího procesu, jak můžeme vidět na obrázku 27.



Obr. 26: Princip metody CMT [26]

Rychlost podávání drátu není konstantní, ani není řízena časovým, předem zadaným programem. Drát je vysouván směrem k obrobku do té chvíle, než dojde ke zkratu. Poté je směr obrácen a drát se vtahuje zpět. V okamžiku, kdy je zkrat přerušen, opět dojde ke změně směru a drát je vysouván do svaru. Posuv drátu tedy neprobíhá podle předem nastavené časové osy, ale je automaticky řízen podle vzniku a přerušení zkratu. Pohyb drátu tedy rozhoduje o tom, co se děje v tavné lázni a tyto děje zpětně ovlivňují směr pohybu drátu. Popsaný princip také zapříčiňuje, že nemůžeme nastavit přesně danou frekvenci oscilace drátu. Nastavená frekvence je vždy průměrnou hodnotou skutečné oscilace drátu. Může se stát, že zkrat nastane dřív, nebo později, což způsobí jeho dřívější, nebo pozdější zatažení oproti nastavené frekvenci.

Druhým podstatným znakem oproti klasickému svařování je skutečnost, že přenos materiálu probíhá téměř s nulovým proudem. U běžného krátkého oblouku dochází k přenosu materiálu pod vysokým zkratovým proudem. U CMT nezapříčiní ukončení zkratu působení proudu, ale zpětný posuv drátu. Tento pohyb také napomůže k uvolnění kapky, ke kterému přispěje i povrchové napětí tavné lázně. Důsledkem je možnost udržet ve fázi zkratu proud na nízké úrovni což snižuje tepelné zatížení návaru.

Dalším významným rozdílem je určování délky oblouku. U běžného svařování krátkým obloukem je jeho délka určována podle velikosti svařovacího napětí. Ten však nezávisí jen na

délce oblouku, ale taky na případném znečištění základního materiálu, přítomných oxidech atd. Tedy je možné, že kvalita povrchu naruší regulaci délky oblouku. Při CMT se drát posouvá ke svařenci až do chvíle kdy vznikne zkrat, což odpovídá nulové délce oblouku. Poté je zahájen zpětný chod drátu předem zadanou rychlostí. V tomto případě je délka oblouku výsledkem doby zpětného chodu a jeho rychlosti. Tedy není řízena podle svařovacího napětí, ale je po každém zkratu nastavena za pomoci mechanických veličin. Za oscilační frekvence drátu 90 Hz je tedy délka oblouku nastavována 90krát za sekundu.

Tímto procesem se udržuje prakticky konstantní délka oblouku. Jak při změnách délky volného konce drátu, tak v souvislosti se změnou kvality povrchu, nebo rychlosti svařování.

Aby bylo možné provozovat tento proces, musí digitálně řízený svařovací systém obsahovat hořák s pohonnou jednotkou a absorpční člen. Digitální řízení je potřeba z důvodu rychlé komunikace mezi jednotlivými komponenty. Pohonná jednotka s funkcí zpětného chodu je zabudována v hořáku, protože motor v podavači drátu má velkou hmotnost (setrvačnost) a nedokázal by měnit směr otáčení dostatečně rychle. Příklad hořáku se zpětným chodem je na obrázku 28. Při procesu CMT dochází k situaci, kdy se motor v podavači drátu točí dopředu a motor v hořáku opačným směrem. Oba motory se v tu chvíli otáčejí proti sobě a je tedy potřeba mít systém vybaven absorpčním členem, který vyrovnává krátkodobé rozdíly délky drátu mezi oběma posuvy. Navíc, pro umožnění vysoké frekvence vysouvání a zasouvání drátu z hořáku, je nutné, aby tento motor v hořáku pracoval téměř bez zatížení. To je také způsobeno absorberem, který můžeme vidět na obrázku 29, jako součást celé svařovací sestavy. Bowden je v absorberu upevněn pouze na jedné straně, druhá je volná. Drát v obloukovém absorberu tedy dosedá na vnější nebo vnitřní okraj podle toho, jestli je drát odebírán, nebo vsouván zpět. Rychlost podavače drátu neboli jeho otáčky, jsou nastavovány tak, aby byl bowden v absorberu v neutrální, střední poloze.



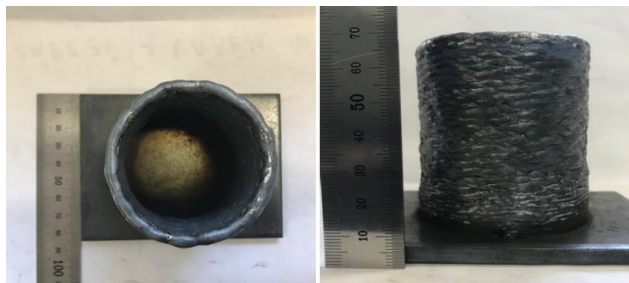
Obr. 27: CMT hořák na robota [27]



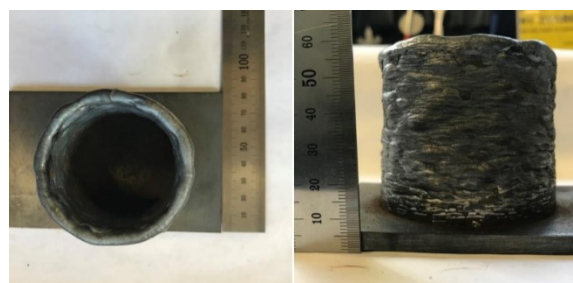
Obr. 28: Robotická sestava pro svařovací proces CMT [27]



Na strojní fakultě ČVUT byl v roce 2018 porovnáván robotický 3D tisk jednoduché struktury technologiemi MAG (viz obr. 30) a CMT (viz obr. 31). Při návaru 20-30 vrstev byl vzhled obou vzorků velmi podobný. Při nánosu 50 vrstev již měl vzorek vytisknutý pomocí CMT lepší vzhled a byl celkově vyšší o 6mm. Odchytky ve výšce byly způsobeny větším vneseným teplem (jak bylo měřeno v experimentu) při MAG svařování, tedy větším roztékáním navařovaných housenek do stran při 30-50 vrstvě návaru.



Obr. 29: Návar pomocí CMT [29]



Obr. 30: Návar pomocí MAG [29]

Na univerzitě Cranfield vytiskli z oceli pomocí CMT lopatku průmyslové plynové turbíny, kterou můžeme vidět na obrázku 32. Díky 3D tisku se ušetřilo 50 % materiálu, 30 % financí, a 20 % času na výrobu.

Dále na Cranfieldské univerzitě vytiskli 10 metrů dlouhý konzolový nosník, který můžeme vidět na obrázku 33. Podle univerzity tento nosník demonstruje možnost eliminace zkroucení i u součástí velkých rozměrů.



Obr. 32: Konzolový nosník [33]

Obě tyto součásti jsou vytisknuty z měkké oceli (ER70s). Materiál po vytisknutí dosahuje pevnosti 500-510 MPa a tažnost 30-33 %.



Obr. 31: Lopatka turbíny [33]

### 3. 1. 3 CMT Cycle Step [30] [32]

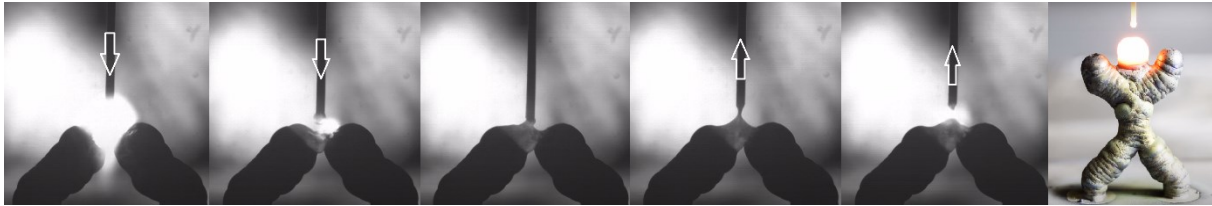
V září roku 2018 představil Fronius novou modifikaci CMT – Cycle Step (viz obr. 34). Digitální regulace procesu podporuje uvolnění kapky při tavení svařovacího drátu tím, že drát posune dopředu. Při přechodu kapky do tavné lázně je vyvolán zkrat na základě kterého je drát zatažen zpět. Oblouk je pak znovu zapálen a následuje nový svářecí cyklus. Díky digitálnímu řízení je možné přesně definovat počet kapek uvolněných do jednoho svařovaného bodu i délku



Obr. 33: CMT Cycle Step [30]

pauly mezi jednotlivými cykly. Výsledkem je tepelná redukce, s čistými přechody a vysokou mírou replikovatelnosti.

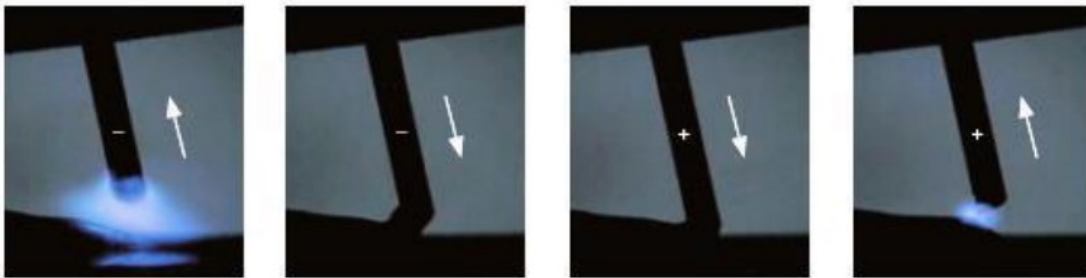
Ocelový mužík na obrázku 35, byl vytisknut na 61 bodech s 1360 cykly.



Obr. 34: Proces CMT Cycle Step [32]

### 3. 1. 4 CMT Advanced/CMT Pulse Advanced [12] [58] [59]

Tento způsob je zatím posledním vývojem CMT. Princip je znázorněn na obrázku 36. Proces kombinuje pozitivní a negativní cykly. Díky tomu je ještě chladnější než klasické CMT. Záporná elektroda se pohybuje směrem do oblouku a je odtavována. Dochází ke zkratu, uvolnění kapky a změně polarizace elektrody na pozitivní. Po zkratu se drát začne zatahovat zpět do hořáku. Oblouk znovu začíná hořet. Po dosažení určité vzdálenosti drátu od materiálu je znovu zahájen dopředný chod drátu, dokud nedojde ke zkratu. Při něm je polarita drátu změněna zpět na negativní a celý proces se takto opakuje.



Obr. 35: Cyklus procesu CMT Advanced [58]

Dalším způsobem je proces CMT Pulse Advanced. Popíšu jej, protože je velmi podobný CMT Advanced a v zahraničních výzkumech nejsou vždy přesně rozlišovány. U Pulse Advanced se také střídá záporná a kladná polarizace elektrody, k jejíž změně dochází při zkratu. Když je elektroda záporně nabitá, dochází ke zkratovému přenosu. Při kladně nabitě elektrodě dochází k bezzkratovému přenosu kapky, přičemž se do materiálu vnáší větší množství tepla. Počet jednotlivých cyklů je možné přesně nastavit.

Proces CMT Advanced byl využit k vytisknutí 2,5 metru dlouhého žebra křídla z hliníku, které je na obrázku 37. Přičemž se díky WAAM ušetřilo téměř 500 kg materiálu oproti obrábění.

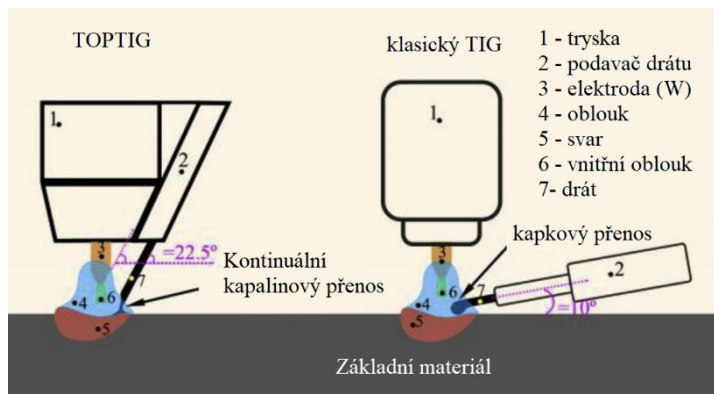


Obr. 36: Hliníkové žebro křídla [12]

### 3. 1. 5 Wolfram Inert Gas [34] [35] [36] [37]

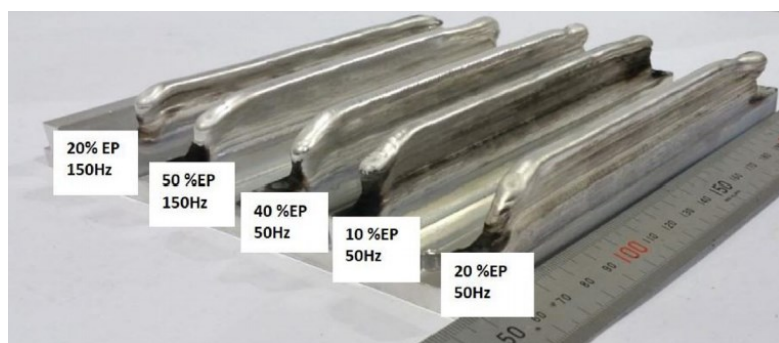
Wolfram Inert Gas (WIG), Tungsten Inert Gas (TIG), nebo Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) jsou všechno názvy pro stejnou technologii svařování. Netavící se wolframová elektroda a základní materiál mezi sebou vytváří oblouk. Do něj je přiváděn drát jako přídavný materiál. Podobně jako u MIG/MAG probíhá proces v ochranné atmosféře.

Při klasickém TIG svařování je nejvhodnější úhel mezi přídavným drátem a základním materiálem  $10^\circ$ . Při 3D tisku je však vhodnější konfigurace TOP-TIG, při které je mezi drátem a základním materiálem úhel  $22,5^\circ$  (viz Obr. 38). Přínos TOP-TIGu oproti klasickému je větší stabilita tavení drátu. Drát se netaví na kapky, ale je kontinuálně odtavován jako kapalina, což vede k bezrozstříkovému charakteru nánosu vrstev. Další výhodou je větší volnost v prostorovém nastavení hořáku a tím flexibilnější nanášení struktur.



Obr. 37: Schéma TOPTIG a klasický TIG [34]

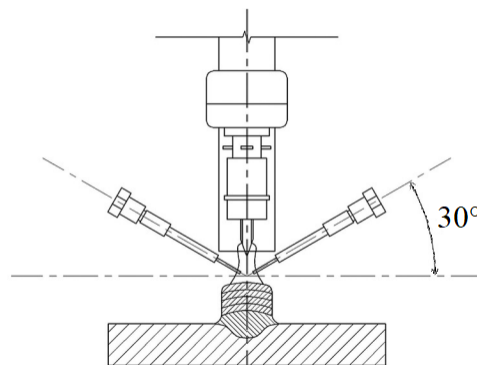
TOPTIG proces byl úspěšně použit pro tisk testovacího vzorku z materiálu ER2594, vysoce legované super duplexní nerezové oceli s příznivými výsledky. Mez kluzu  $R_{p0,2}$  dosáhla hodnoty 530MPa, mez pevnosti  $R_m$  852MPa a prodloužení 35 % s minimálními rozdíly v horizontálním a vertikálním směru testování.



Obr. 38: Provnání návarů při použití ACTIG [34]

vidět na obrázku 39. Efektivní šířka stěny byla nejmenší při 20 % EP, přičemž výška vrstvy byla největší. Bylo zjištěno že čím větší je % EP, tím více se opotřebovává elektroda, což ovlivňuje stabilitu oblouku. Různé % EP nemají výrazný vliv na mechanické vlastnosti vzorku.

Technologie přímého legování (in-situ alloying) je zajímavý proces tvorby slitiny zároveň s procesem 3D tisku, kdy jsou do TIG oblouku přiváděny dva přídavné materiály zároveň (např. Ti s Al, nebo Al-Cu s Al-Mg). Oba dráty jsou do oblouku přiváděny pod úhlem  $30^\circ$  jak je schematicky znázorněno na obrázku 40. Tento proces umožní vytvářet 3D struktury i ze slitin, které je obtížné zpracovat zvláště v jednom drátu.



Obr. 39: Schéma přímého legování [36]

### 3. 1. 6 Plasma Arc Welding [13] [39] [40] [41]

Zkráceně PAW je metoda, která k tavení přídavného materiálu ve formě drátu používá plazmatický proud. Metoda je odvozena od technologie TIG, kdy vzniká oblouk mezi netavicí se wolframovou elektrodou a základním materiálem. Do oblouku je přiváděn plazmový plyn, který se v oblouku ionizuje a tím vzniká plazmový paprsek. Vše probíhá v ochranné atmosféře plynu, který také vychází z hořáku.

Firma Norsk Titanium patentovala technologii Rapid Plasma Deposition pro výrobu součástí motorového, leteckého i vesmírného průmyslu. Zaměřují se na tisk z titanu, ovšem jsou schopni tisknout i z dalších materiálů, jako ocel, nerezová ocel nebo niklové slitiny. U titanu firma zaručuje stejné mechanické vlastnosti jako u litých součástí. MERKE IV je stroj čtvrté generace, kterým Norsk Titanium disponuje. V pracovním prostoru 900mm x 600mm x 300mm je nanášen materiál rychlostí 5-10kg za hodinu. Rozměry nanášených vrstev jsou na výšku 3-4mm a na šířku 8-12mm. V roce 2017 byla titanová součást na obrázku 41, vyrobená v Norsk Titanium, poprvé použita v trupu Boeingu 787 Dreamliner a od té doby je pro tento účel vyráběna sériově.



Obr. 40: Titanová součást [40]

Španělská univerzita Basque Country UPV/EHU ve spolupráci s dalšími partnery porovnávala procesní, mechanické, geometrické a metalografické vlastnosti stěny 200 x 100 x 20 mm vytisknuté technologiemi GMAW a PAW, které lze vidět na obrázku 42. V porovnání s výkovkem bylo dosaženo vhodných mechanických vlastností oběma technologiemi. U PAW je maximální pevnost v tahu vyšší o 23 % a tažnost o 56 % oproti GMAW ve vertikálním směru. Bez rozdílu je pevnost v tahu, tažnost i lomová houževnatost (testováno na Charpyho kladivě) v příčném, horizontálním směru. Aby bylo dosaženo stejných rozměrů vzorků, bylo u PAW potřeba více návarových housenek než u GMAW. Pro GMAW bylo potřeba nanést 55 vrstev a pro PAW 60 vrstev. Rozdíly v počtu vrstev jsou způsobeny výrazně větším vneseným teplem při použití technologie PAW.



Obr. 41: Stěna vytisknutá pomocí PAW vlevo, pomocí GMAW vpravo [41]

### 3. 2 Electron Beam Additive Manufacturing [42] [43] [60]

Zkráceně EBAM je technologie využívající k tavení přídavného materiálu ve formě drátu elektronový paprsek. Zdrojem svazku elektronů je tzv. elektronové dělo neboli vakuová válcová nádoba vybavená žhavenou emisní elektrodou a oddělovacím uzávěrem na kterém je i optika skrz kterou proudí elektrony. Vakuum je v děle potřebné k termoemisi elektronů, chemické a tepelné izolaci katody, zabránění vzniku oblouku mezi elektrodami a zabránění srážkám mezi elektrony a molekulami vzduchu. Srážka elektrony brzdí a vychyluje je z přímého směru. Proto i vlastní proces 3D tisku probíhá ve vakuové pracovní komoře.

Elektron je termoemisí uvolněn ze žhavené záporně nabitě elektrody (W, Mo, Ta, Te, Nb, pro nejvyšší výkon LaB<sub>6</sub>) a je od ní odtržen zaostřovací elektrodou. Díky jeho velmi malé hmotnosti je možné elektron urychlit pomocí elektrického pole na vysokou rychlost (25-75 % rychlosti světla). Kinetická energie a následný náraz elektronů na povrch materiálu vyvolají jeho požadované zahřátí.

Z důvodu vzájemných odpuzivých sil mezi elektrony je jejich svazek je zaměřován na místo dopadu pomocí magnetických polí a vychylovacího systému. Vychylovací systém slouží k zaměření svazku na určené místo a u některých zařízení také ke skenování. V cyklech (0,5-2 ms) je vysílán svařovací paprsek s nízkým výkonem sloužící k vedení svazku ve svaru během svařování, nebo pro snímání odražených elektronů čímž je získán obraz svarové plochy.

Firma Sciaky se věnuje svařování elektronovým paprskem od roku 1950 a od roku 1996 vyvíjí aditivní výrobu pomocí této technologie. Dodává EBAM stroje v několika provedeních s možností tisknout titan, tantal, niklové slitiny, inconel, nerezovou ocel atd. Všechny stroje jsou vybaveny monitorovacím systémem IRISS. Ten obsahuje sensory, software a CNC řízení které dohromady kontrolují svařovací parametry (sílu elektronového paprsku, rychlost podávání drátu, rychlost pohybu CNC stroje), aby mohly být v reálném čase upravovány pro dosažení dokonalého návaru. Nánosové rychlosti udává firma mezi 3 a 11 kilogramy za hodinu, podle materiálu a složitosti geometrie součásti. Je možno svařovat jednodrátově i dvoudrátově jak je vidět na obrázcích 43 a 44.



Obr. 42: Dvoudrátový EBAM [43]



Obr. 43: Jednodrátový EBAM [43]



Obr. 44: Kopule palivové nádrže [42]

Sciaky dodala své stroje spoustě světovým firmám, včetně Lockheed Martin, která tak přešla od obrábění titanových palivových nádrží k jejich 3D tisknutí. Palivová nádrž se skládá z jednoho tradičně vyrobeného válce a dvou vytisknutých kopulí na obrázku 45. Kopule má v největším průměru 1,16 metru a po několika letech vývoje byla v roce 2018 poprvé použita. Do té doby byly kopule vyráběny obráběním s 80 % odpadního materiálu a doba dodání byla až dva roky. Nyní jsou kopule dodávány do tří měsíců s minimálním odpadem.

### 3. 3 Wire-Laser Additive Manufacturing [44] [45] [60]

Zkráceně WLAM využívá laserový paprsek k tvorbě svarové lázně, ve které je následně taven drát jako přídatný materiál. Pojmenování LASER vzniklo z počátečních písmen anglického popisu podstaty principu jeho činnosti Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, česky zesílení světla stimulovanou emisí záření.

Bohrova teorie elektronového obalu říká, že po absorpci fotonu přejde elektron na vyšší kvantovou hladinu ( $E_2$ ), kde má energii zvýšenou o energii pohlceného fotonu, čemuž se říká excitovaný stav. Naopak samovolný přechod elektronu zpět na základní hladinu ( $E_1$ ) vyzáří energii ve formě fotonu tzv. spontánní emisí záření.

Einstein vysvětlil vybuzení atomů aktivního prostředí vlnou s danou frekvencí kmitání. Vnější kvant elektromagnetického záření (foton) dopadá na atom (molekulu, iont), který je v excitovaném (vybuzeném) stavu na hladině  $E_2$ . Vybuzený atom se vrací na základní hladinu a emituje nový foton. Tento proces je nazýván stimulovanou (vynucenou) emisí záření. Je využíván pro zesílení záření o jedné vlnové délce na rozdíl od emise spontánní, kdy je vyzářená energie v různých vlnových délkách nevyužitelně ztracena ve formě tepla.

Popsaný proces probíhá v aktivním prostředí pevném (rubínový krystal), kapalném, nebo plynném ( $\text{CO}_2$ ). Energie je získávána elektrickým výbojem, optickým čerpáním, nebo chemickou reakcí. Laserové dělo je válcová trubice, kde je na jedné straně zrcadlo se 100 % odrazivostí a na druhé polopropustné s 80-90 % odrazivostí. Po dosažení kritického množství fotonů jich část projde ve formě vysokoenergetického krátkého pulsu s frekvencí 1-500Hz.

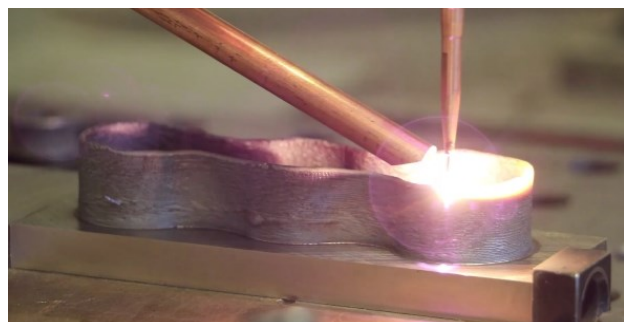
Po dopadu svazku fotonů na materiál dojde ke zvýšení frekvence vibrací krystalové mřížky a tím se zvýší jeho teplota. Část energie svazku se odrazí, část je pohlcena a využita k ohřevu materiálu a hodně malá část materiálem prochází. Pohlcená část proniká do povrchové vrstvy, přičemž je hloubka průniku závislá na výkonu zdroje, frekvenci záření a vodivosti materiálu.

Na Cranfieldské univerzitě, kde tuto technologii zkoumali, přišli na dvě různé možnosti přenosu kapek kovu. Jeden využívá k přenosu kapky gravitaci, druhý povrchové napětí. Jako největší výhodu využití laseru označují možnost nezávisle kontrolovat a měnit výšku a šířku nanášené vrstvy. Toho je dosaženo flexibilní šířkou paprsku laseru, jeho hustotou výkonu ale také rychlostí podávání materiálu.



Obr. 45: Výtisk mikroWLAM [44]

Firma Laserline používá WLAM komerčně pro výrobu malých komponentů jako na obrázku 46 a 47. Laserline dodává lasery a vybavení (práškové trysky, laserové čočky) s kterým je možné nejen 3D tisknout ale zároveň součásti svařovat nebo kalit.

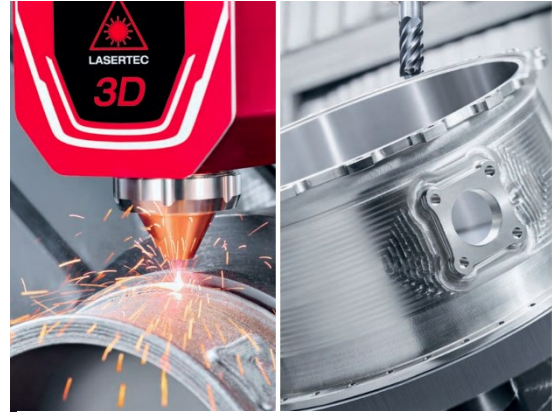


Obr. 46: WLAM součást [44]

### 3. 4 Hybridní stroje [62] [63] [64] [65] [66]

Prakticky všechny součásti vyrobené 3D tiskem je nutné dále obrábět, pro dosažení finálního tvaru. Kombinace DED technologie s klasickým obráběním v jednom hybridním stroji přináší jak usnadnění a urychlení výrobního procesu, tak zcela nové možnosti. Lze jej využít k výrobě nových součástí, úpravě/vylepšení nové součásti, nebo opravě použitých součástí.

Při výrobě nových součástí je díky hybridizaci procesu možné obrobít převislé, nebo vnitřní prvky, které by byly při postupném procesu (nejdřív 3D tisk a až poté obrábění) neobrobitelné. Hybridní stroj totiž může proces 3D tisku zastavit v jakékoli fázi tisku, obrobít potřebný vnitřní profil a až poté pokračovat. Toto je možné provést i několikrát v průběhu celého procesu. Tato výhoda může pomoci i při opravě poškozených součástí.



Obr. 47: Hybridní výroba součásti [62]

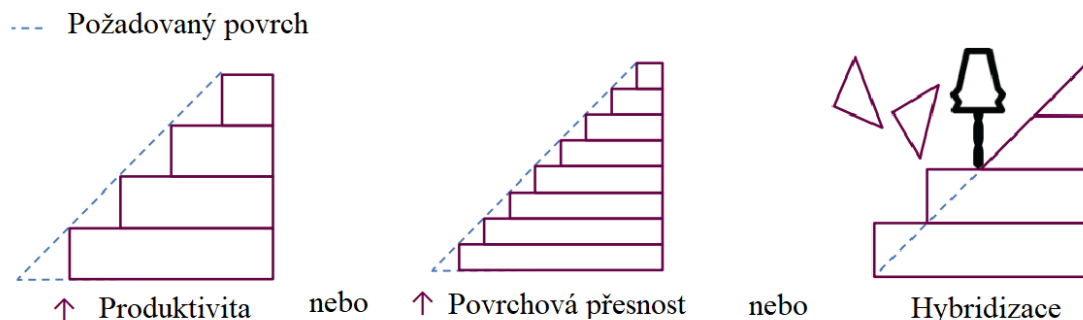
Díky využití více osých obráběcích center je možné v jedné komoře vyrobit hřídel, nebo jinou válcovou součást, navařit na ni potřebné prvky a poté obrobít na čisto, jak je vidět na obrázku 48 při výrobě pláště turbíny. Takové stroje dodává například firma DMG Mori, nebo Mazak.

Společnost Hybrid Manufacturing Technologies přináší další vylepšení hybridních strojů díky nástrojům k měření a inspekcii součástí. Je tak možné měřit přesnost už při procesu výroby a předejít tak zmetkovitosti drahých a komplexních součástí, jak je vidět na obrázku 49. Všechny nástroje jsou vybaveny stopkou a je tedy možné je použít v jakémkoli CNC obráběcím centru po integraci příslušných softwarů.



Obr. 48: Nástroje dodávané firmou Hybrid Manufacturing Technologies [65]

Při 3D tisku je možné vyrábět rychle, s vysokou produktivitou, ale horším povrchem, nebo pomaleji s lepším výsledným povrchem. Řešením tohoto ekonomického problému jsou právě hybridní stroje, což schematicky ukazuje obrázek 50.

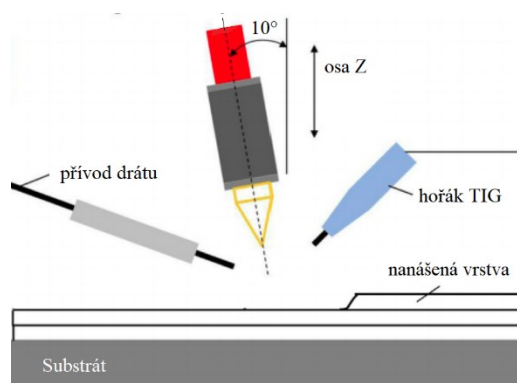


Obr. 49: Schematické vysvětlení výhody hybridní výroby [66]

### 3. 5 Hybridní technologie [67] [68] [69]

Hybridní stroj používá v jednom pracovním prostoru více technologií (svařování, obrábění) odděleně. Hybridní technologie spojují různé technologie do jedné. Ve výzkumech jsou spojovány MIG, CMT, TIG i Plazmové aditivní technologie s laserem. Laser zde slouží jako podpůrný element k lepšímu přenosu kapky, lepším mechanickým vlastnostem a dokonalejším výtiskům bez poruch.

Spolupráce technologických univerzit z Dalian, Šanghaje a Singapuru ukázala výhody spojení technologie navařování TIG s laserem. Schéma je zobrazeno na obrázku 51. Při tomto spojení bylo dosaženo o cca 40 % menších zrn oproti tisku samostatným TIGem. Toho je dle výzkumu dosaženo vyšší rychlostí chlazení při použití laseru, což vede k většímu podchlazení, a tedy k menším zrnům. Přidání pulsního laseru přispívá také k rozmělnění dendritů v klíčové dírcce (key hole). Dendrity jsou poté smíchány s nataveným materiálem a zvyšují nukleační body. Více těchto bodů taktéž přispívá k jemnějším zrnům.

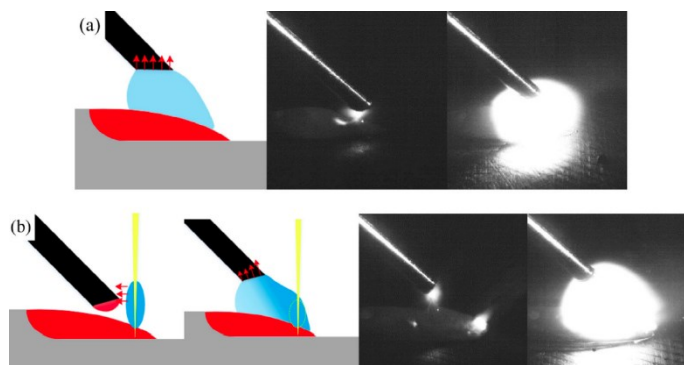


Obr. 50: Schéma laser-TIG [67]

Na technologické univerzitě a ve výzkumném centru z Chongqing bylo zkoumáno spojení plazmové aditivní technologie s laserem. Zaměřené na charakteristiky mikrostruktury a zároveň na mechaniku ovlivnění svaru pulsním laserem. Experimenty ukázaly že odpovídající intenzita laseru podporuje homogenitu austenitu, jemnost zrn a redukci porozity. Směr zrn je při použití laseru nahodilejší, což způsobuje menší rozdíly mechanických vlastností mezi různými směry zatížení vzorků. Hlavním důvodem pozitivního přínosu laseru je kolísání svaru mezi pevným a kapalným skupenstvím což vede k rozvíření tekutého svaru, redukci teplotního gradientu, změně směru maximálního teplotního gradientu a rozbití dendritů na další nukleační prvky.

Teplotní efekt laseru na přenos kapky při CMT procesu zkoumaly technologická univerzita Harbin a výzkumný institut vesmírného letectví Šanghaj. Hlavním faktorem byla vzdálenost laseru od drátu což ovlivnilo spojení mezi laserem a hořícím obloukem. Zvyšující výkon laseru akceleroval tavení drátu a zvětšil rozměr svaru, což vedlo k vyšší frekvenci přenosu kapek. Proudění ochranného plynu ovlivnil chování přenosu kapek změnou teplotního efektu laseru. Při vysokorychlostním svařování byla zlepšena přenosová frekvence kapek, tvorba svaru i adaptabilita procesu díky přidání laseru, který stabilizoval oblouk a zabránil přilepení drátu k materiálu.

Teplotní efekt laserového plazmatu je vidět na obrázku 52. Při klasickém CMT procesu hoří oblouk mezi svarem a drátem. Utavená plocha je tím pádem horizontální. Po přidání laseru je špička drátu natavována i teplem laserového plazmatu, což způsobuje naklonění roviny tavení elektrody. Laser přitahuje tok elektronů v oblouku což způsobuje jeho celkové rozšíření a možnost rychlejšího tavení samotného drátu.



Obr. 51: Tavení drátu při CMT(a), laser-CMT(b) [69]

Větší vzdálenost mezi obloukem a laserem vede ke zvýšení frekvence přenosu kapky, zatímco její objem je menší. Při kratší vzdálenosti teplotní efekt laseru zvyšuje utavování drátu což zároveň zpomaluje přenosový proces.



## 4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experiment měl být zaměřený na 3D tisk kovu na Ústavu Strojírenské Technologie (ÚST), VUT. Stávající pracoviště disponuje průmyslovým robotem KUKA, typu KR5 Arc, včetně řídicí skříně KRC2 a ovládacího panelu KCP2.0, otočným stolem KUKA typu DKP400 a svařovacím automatem Fronius TransTig4000 Job G/F s Plazmovým modulem 10, včetně příslušenství s technologií svařování plasmu s vodním chlazením a podávacem studeného drátu KD7000 D-11, na obrázku 53.



Obr. 52: Svářecí robotické pracoviště ÚST

Pro 3D tisk je výše popsaná sestava nevyhovující a je nutné zajistit její upgrade. Firma Fronius (dodavatel), vytvořila nabídku k doplnění stávajícího plazmového zdroje o software a hardware, aby bylo možné svařovat horkým a studeným drátem.

- TransTig 2200 Job G/F, plně digitalizovaný, mikroprocesorem řízený invertorový zdroj.  
Cena 67.248 Kč.
- Software: FS Mode CC/CV, pro 3D tisk.  
Cena 10.880 Kč.
- Rob5000 Interface LocalNet, řídicí jednotka.  
Cena 29.640 Kč.
- Zemnicí kabel 25 mm, 4 m + zástrčka 35 mm + proudová přípojka.  
Cena 3816 Kč.
- Kabel zemnicí 25 mm<sup>2</sup> 4 m/250 A/ 60 % + zástrčka 35 mm<sup>2</sup>.  
Cena 1052 Kč.
- Kabel k dálkovému regulátoru 10 pólu/5 m.  
Cena 2504 Kč.

Celková cena, již po započtení 20 % slevy, vychází 115.140 Kč bez DPH.

Integrátor Blumenbecker dále nabídl implementaci softwaru, školení a servis pro využití 3D tisku na robotu KUKA z ÚST. Rozsah dodávek pro implementaci softwaru:

- Implementace Software Power Mill premium pro robotické pracoviště KUKA. Kalibrace koncového efektoru robota a tvorba postprocesoru.  
Cena 54.150 Kč bez DPH.
- Školení obsluhy. 7 dní na software Power Mill premium. 2 dny školení na robota KUKA. Celkem pro 1-3 osoby, přičemž absolvování tohoto školení je povinné pro poskytnutí plné technické podpory.  
Cena 93.500 Kč bez DPH
- Roční předplatné technické podpory pro software Autodesk PowerMill. Služba technické podpory produktu na telefonu, emailem a vzdáleně přes TeamViewer. Služba se nevztahuje na podporu studentů, ale pouze na vyškolené uživatele.  
Cena 66.000 Kč bez DPH

Celková cena 212.650 Kč bez DPH

Základní školení robotu KUKA pro maximálně 3 osoby na pracovišti zákazníka v délce 1 den- 8 hodin. Absolventi školení se seznámí se základními funkcemi robota, budou seznámeni s jeho základními komponenty (mechanickými i elektrickými). Absolventi by měli být schopni online naprogramovat jednoduché pohyby robota a ovládat jednoduché zařízení nesené robotem. Téma školení „Obsluha a základní programování robotů KUKA“:

- Software robotu KUKA
- Programování dráhy
- Úprava a korekce dráhy
- Krokování a programování dráhy

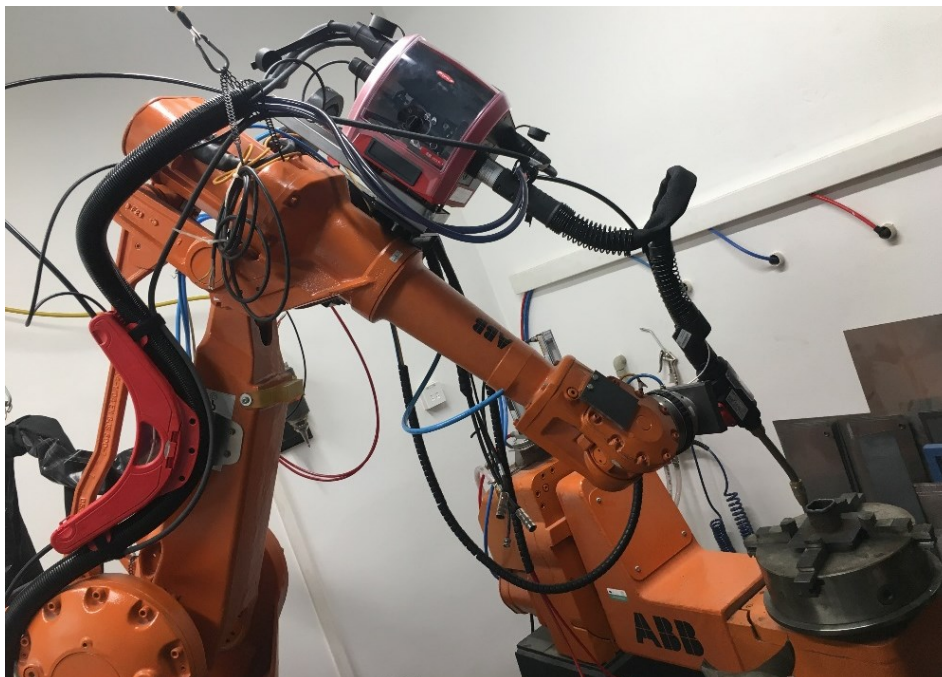
Cena za školení:

- pro 1 osobu 16.900 Kč
- pro 2 osoby 19.900 Kč
- pro 3 osoby 22.900 Kč.

Všechny ceny uvedeny bez DPH

Servisní činnost poskytne preventivní údržbu, která bude vykonána servisními technikami zhotovitele. Předpokládaná doba servisu je jeden den, při němž je objednatel povinen odstavit výrobní linku a zajistit pracovní prostor okolo robota. Na pracovišti musí být zajištěn přívod tlakového vzduchu s regulovatelným výtokem. Měření vůlí převodovek je pouze orientační a není možné touto metodou stanovit, zda je převodovka poškozená, nebo jestli dojde k jejímu poškození. Měří se stav v předepsané pozici, zda odpovídá tabulkovým hodnotám dle typu převodovky. Vyhodnocení je dle mustru: zelená – OK, žlutá – vůle v mezi, červená – NOK. Tato preventivní údržba robota KR5 ARC s otočným stolem je předplacená na 20.000 hodin práce robota, nebo 5 let. V ceně je započítána výměna olejů, práce techniků, cestovní náklady, všechny předepsané materiály + spotřební materiál, díly co jsou potřeba vyměnit (řemínky, baterie atd.), odvoz a ekologická likvidace věcí. Případné závady zjištěné při preventivní údržbě budou odstraněny dodatečně, práce a materiální tyto opravy nejsou zahrnuty v ceně. Celková cena 54.375 Kč bez DPH.

Pro přizpůsobení robota na ÚST k 3D tisku je potřeba jednorázově investovat 409.065 Kč. Tuto částku se nepodařilo získat, pro experimentální část práce byla proto navázána spolupráce s Akademií věd, Ústavem Přístrojové Techniky (AV, ÚPT). Zde byla pro experiment použita technologie WAAM- CMT, Cycle Step zajištěná svařovací hlavou Fronius. Ta byla nesena robotem ABB IRB 2400 s nosností 20 kg a pracovním rozsahem 1600 mm. Robotická sestava je na obrázku 54.



Obr. 53: Svařecské robotické pracoviště ÚPT, AV

#### 4. 1 Svařovací drát

Pro experiment byl použit normovaný svařovací drát firmy Novofil EN ISO 14341-A: G3Si1, průměr 1 mm. Produktové označení NOVOFIL SG2. Výrobce zaručuje, že materiál byl vyroben, odebrán, testován a zkontrolován v souladu s doporučenými standardy EN ISO 9001. Mez kluzu 470 MPa, mez pevnosti 560 MPa, tažnost 26 %. Chemické složení v tabulce 3 a materiálový list v příloze 1.

Tabulka 3: Chemické složení drátu

C	Mn	S	P	Si	Cu	Al	Mo	Ni	Cr	Ti	N	V
0,075	1,435	0,002	0,013	0,84	0,015	0,004	0,002	0,006	0,012	0,002	0,005	0,002

Svařitelnost a zároveň potřebu předehřevu je možné ověřit výpočtem uhlíkového ekvivalentu, k němuž je použit vzorec 2.2:

$$C_e = 0,075 + \frac{1,435}{6} + \frac{0,012}{5} + \frac{0,006}{15} + \frac{0,002}{4} + \frac{0,015}{13} + \frac{0,013}{2} + 0,0024 \cdot 20 = 0,37 \%$$

Pro oceli s obsahem uhlíku  $C < 0,22 \%$  a uhlíkovým ekvivalentem  $C_e < 0,50 \%$  není nutné provádět předehřev materiálů. Drát tedy splňuje požadavky svařitelnosti a nehrozí u něj vznik horkých ani studených trhlin. Předehřev zároveň není nutné použít, protože při 3D tisku experimentálního vzorku je jeho velikost malá a předcházející vrstva nestihne zchladnout, před nanesením další.

## 4. 2 Tisk vzorku

Experimentálním výtiskem byla kostka o velikosti 100 x 100 x 100 milimetru, která je na obrázku 55. Pro výtisk technologií CMT byl použitý plyn se složením 92 % Ar + 8 % CO<sub>2</sub>, což pro svařování není běžné, ale v kombinaci s CMT jsou výtisky vizuálně kvalitnější, než při použití běžného ochranného plynu 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>. Pro další zkoušky budou proto použity pouze vizuálně kvalitnější vzorky.

Parametry odladěného procesu, optimalizované pro 3D tisk:

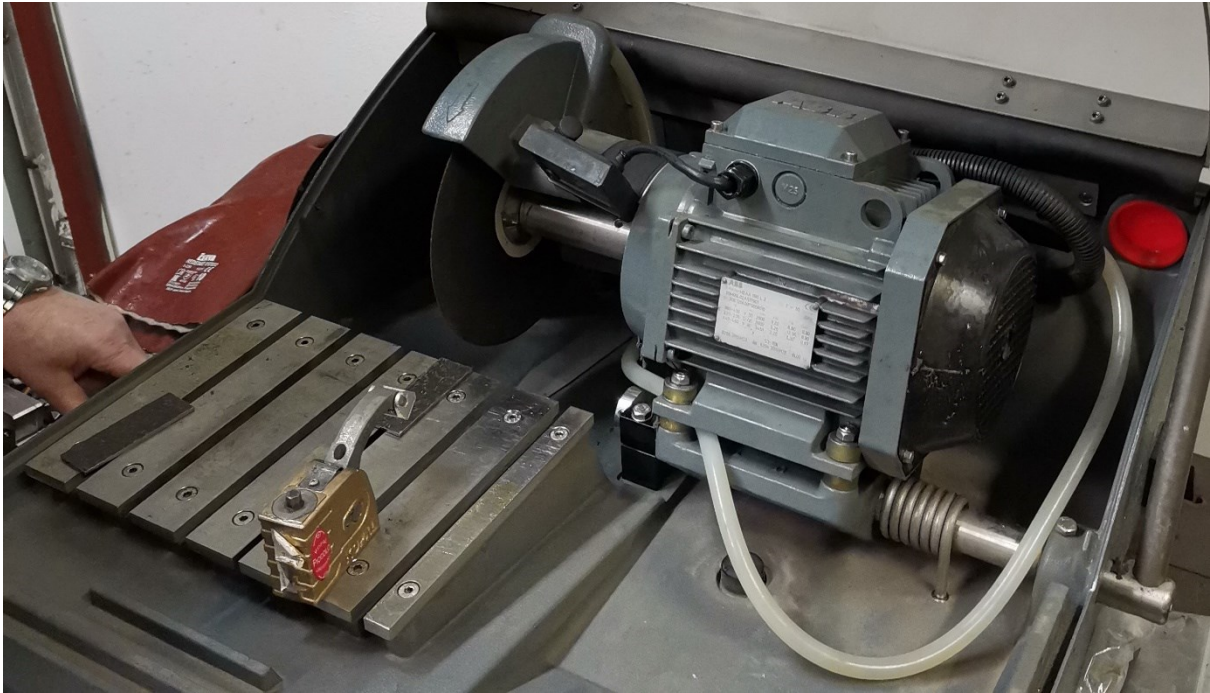
- Průtok ochranného plynu 17 l/min
- Proud 107 A
- Napětí 14,7 V
- Rychlost podávání drátu 3,8 m/min
- Posuv svářecí hlavy 10 mm/s
- 8 cyklů
- Přerušení 0,06 s



Obr. 54: 3D výtisk, kostka

### 4. 3 Vyhodnocení požadavků pro 3D výtisk

Kostka byla po vytisknutí rozřezána na vzorky o velikosti 85 x 25 mm, aby bylo možné provést vyhodnocení povrchových a mechanických vlastností materiálu. Řezba byla provedena na ruční pile Struers Labotom-5, jež je vidět na obrázku 56. Použit byl řezný kotouč pro tvrdé materiály značky Streurs, typ 50A25, 250 x 1,5 x 32 mm. U vzorků byly provedeny řezy v rovině rovnoběžné se směrem nanášení housenky, tedy v horizontálním směru vzhledem k podstavě, na které byl výtisk proveden



Obr. 55: Ruční pila Struers Labotom-5

Pro zkoušky povrchu bylo potřeba vzorky přebrousit, protože povrch je po 3D tisku značně zvlňný. Jeho drsnost ani nemá cenu měřit, což je patrné z obrázku vytisknuté kostky. Broušení a leštění vzorků bylo provedeno na dvoukotoučové brusce a leštičce Saphir 330, která je na obrázku 57. Vždy postupně různě zrnitými brusnými papíry s chlazením vodou. Zrnitost odkazuje na hrubost papíru. Čím je číslo P nižší, tím hrubší je. Vzorky byly postupně broušeny papírem P80, P120, P180 a nakonec P240.

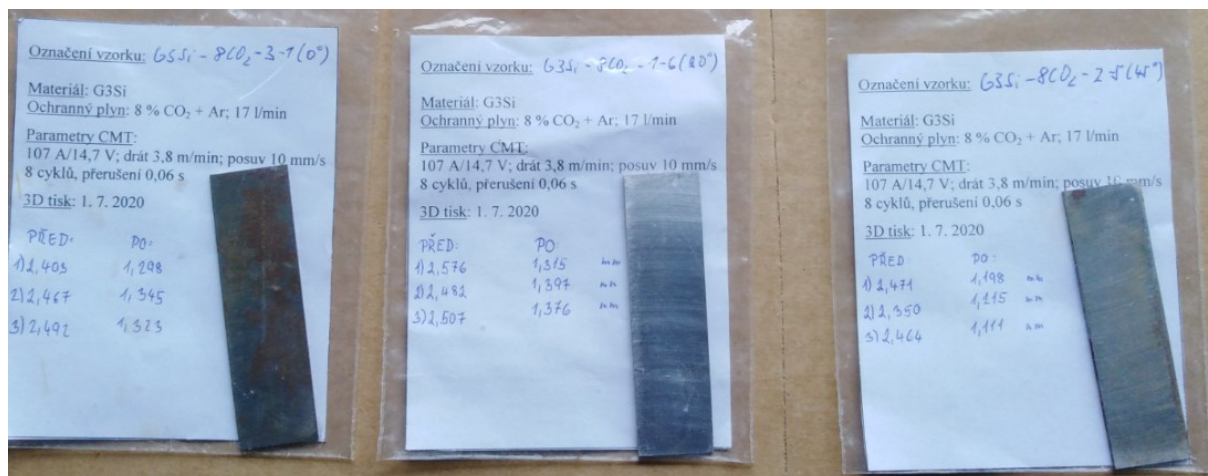


Obr. 56: Bruska Saphir 330

### 4. 3. 1 Povrchové požadavky-kapilární zkouška

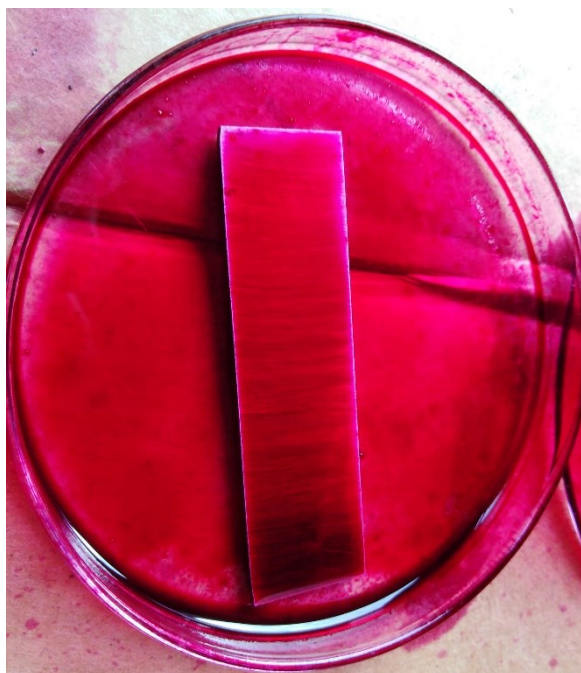
V experimentu nebudeme měřit povrchovou texturu (drsnost) jak udává norma o 3D tisku 17296-3, ale nahradíme ji nedestruktivní kapilární zkouškou, takzvanou penetrační kontrolou. Měřit drsnost vytisknutého materiálu (bez opracování) v našem případě nemá význam.

Po přebroušení všech vzorků byly vzorky podrobeny vizuální kontrole, při které nebyly zjištěny žádné okem viditelné vady dle obrázku 58, přešlo se tedy k samotné penetrační zkoušce. Nejprve byly vzorky očištěny mechanicky, aby došlo k odstranění případných částecek po broušení. Poté chemicky rozpouštědlovým čističem Crick 110, který slouží k odstranění jakýchkoli dalších nečistot. Ten se na vzorcích nechal uschnout 5 minut.



Obr. 57: Vzorky po broušení

Celý postup penetrační zkoušky byl prováděn za pokojové teploty. Na všechny vzorky byl po chemickém očištění nanesen červený penetrant ve spreji značky Diffu-Therm jak je vidět na obrázku 59. Nechal se působit 15 minut. Po zaschnutí byly přebytky penetrantu odstraněny mechanicky pomocí hadry. Následně byla nanesena sprejová vývojka na bázi rozpouštědla značky Diffu-Therm jak je vidět na obrázku 60 a nechala se působit 15 minut.

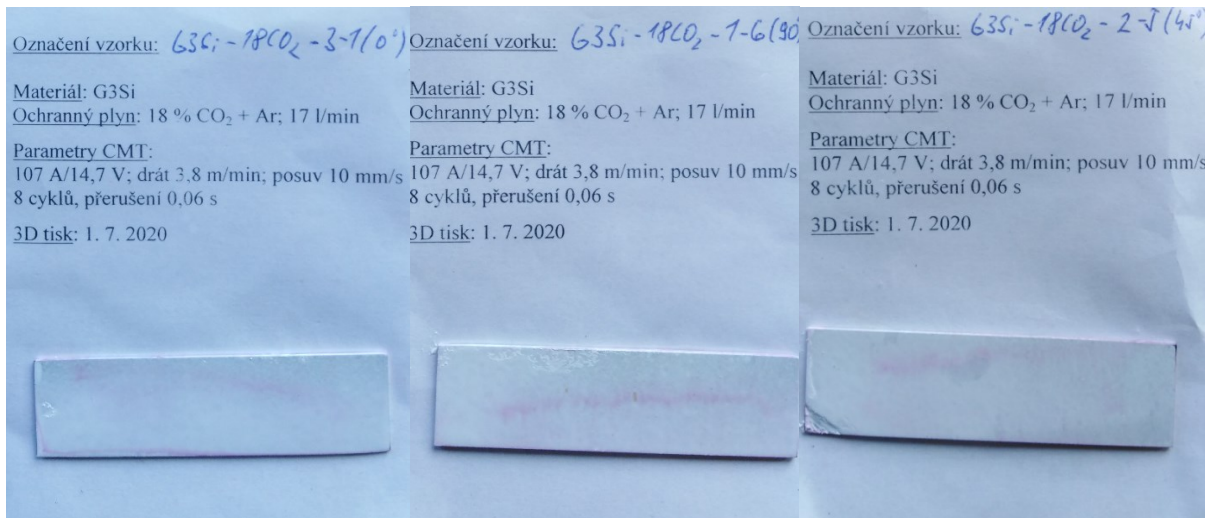


Obr. 58: Nanesení penetrantu



Obr. 59: Nanesení vývojky

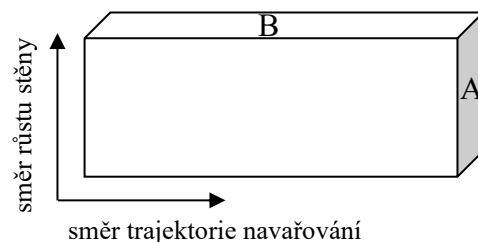
Po zaschnutí vývojky byla zkouška vyhodnocena. Na žádném ze vzorku se neprojevila viditelná vada. Povrch zůstal bílý, neobjevily se výrazné červené tečky, které by vznikly, kdyby na povrchu vada byla. Jemné červené pásy vznikly z důvodu podbroušení a nedokonalého očištění penetrantu, jak je vidět na obrázku 61.



Obr. 60: Výsledek penetrační zkoušky

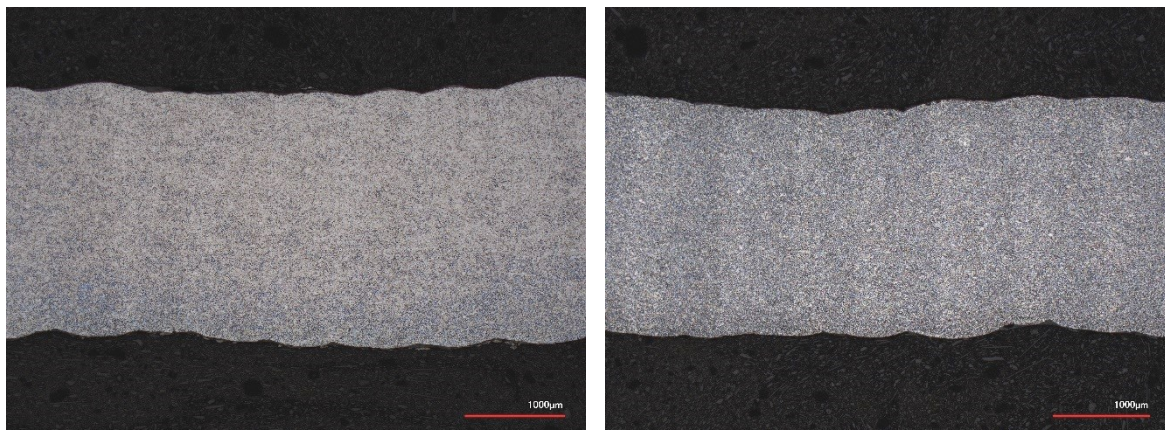
#### 4. 3. 2 Povrchové požadavky-mikro a makrostruktura

Metalografické hodnocení vzorků bylo provedeno na Ústavu přístrojové techniky, Akademie věd. Byly zkoumány vzorky řezané v rovině kolmé k trajektorii navařování (výbrusy označené A1 ze zakřiveného úseku a A2 z přímého) a dále v rovině horizontální, tj. v podélném řezu n-tou housenkou, což je schematicky vidět na obrázku 62 (výbrusy B1 z přímého úseku, vzorky C1 ze zakřiveného). Vzorek 1 byl navařován se směsí plynů Ar + 8 % CO<sub>2</sub>, vzorek 2 se směsí Ar + 18 % CO<sub>2</sub>. Vzorky byly leptány 3% nitalem po dobu 15 s.

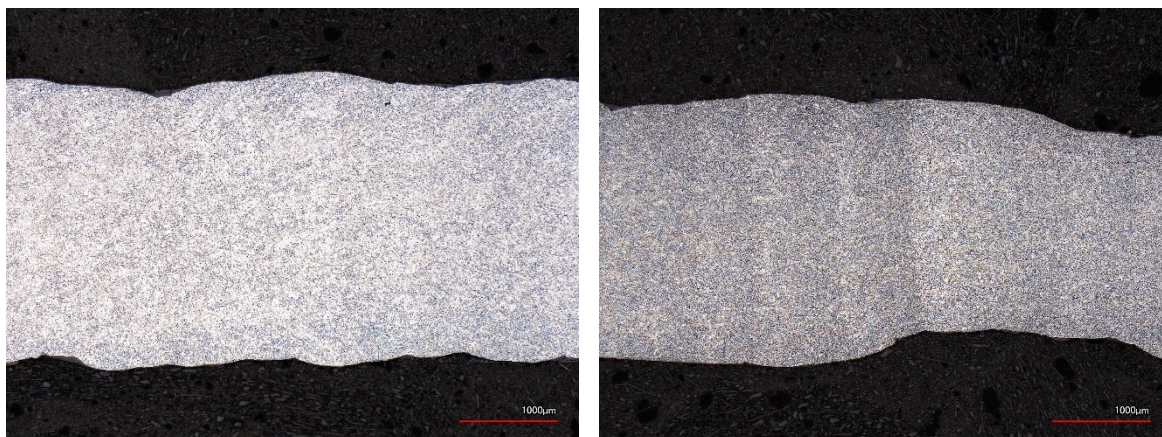


Obr. 61: Směr řezu vzorků

Navařený stěna je poměrně zvlněná a má i velkou drsnost, která plyne z použité technologie, jak je vidět na obrázku 63 a 64. Snímky jsou přibližně z poloviny délky výbrusu a nasnímány mikroskopem Keyence VK-X.

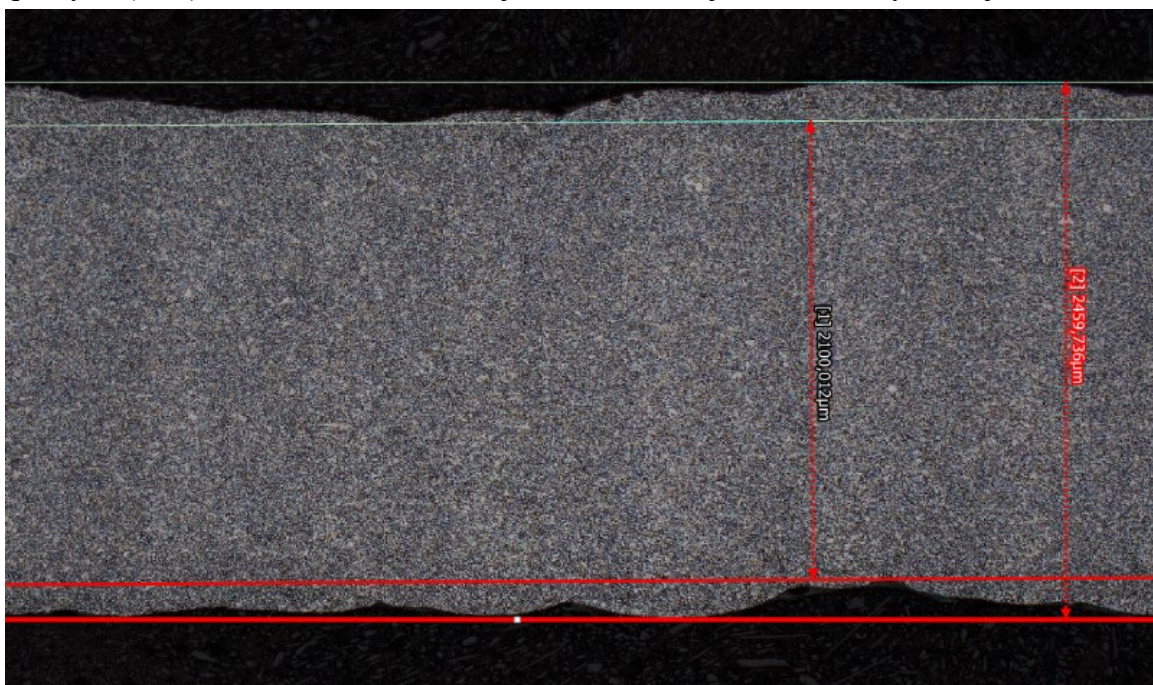


Obr. 62: Příčné řezy vzorku 1 zleva A1 a A2



Obr. 63: Příčné řezy vzorku 2 zleva A1 a A2

Šířka stěny návaru byla měřena na příčných řezech A, jako vzdálenost vepsaných (min) a opsaných (max) rovnoběžek, což ukazuje obrázek 65. Zjištěné hodnoty shrnuje tabulka 3.



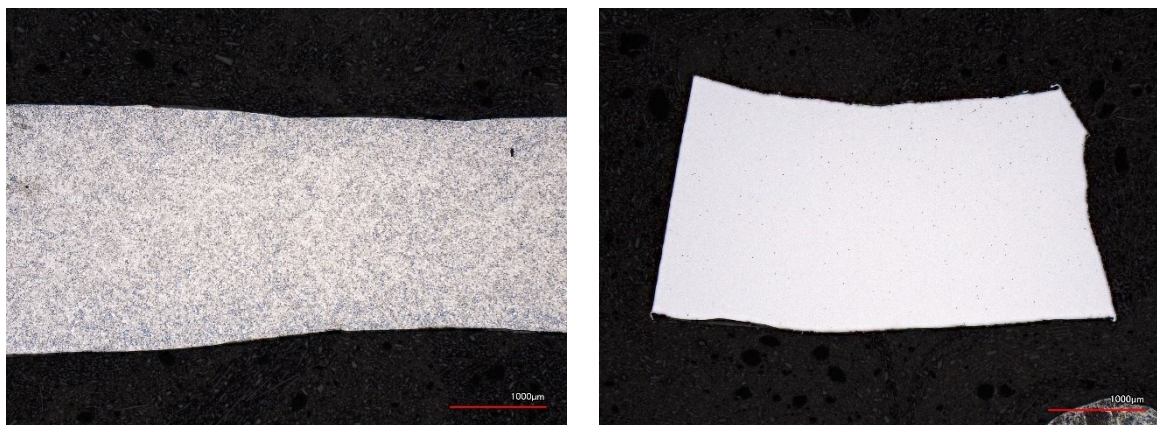
Obr. 64: Měření šířky stěny návaru

Tabulka 4: Měření šířky stěny návaru min/max [mm]

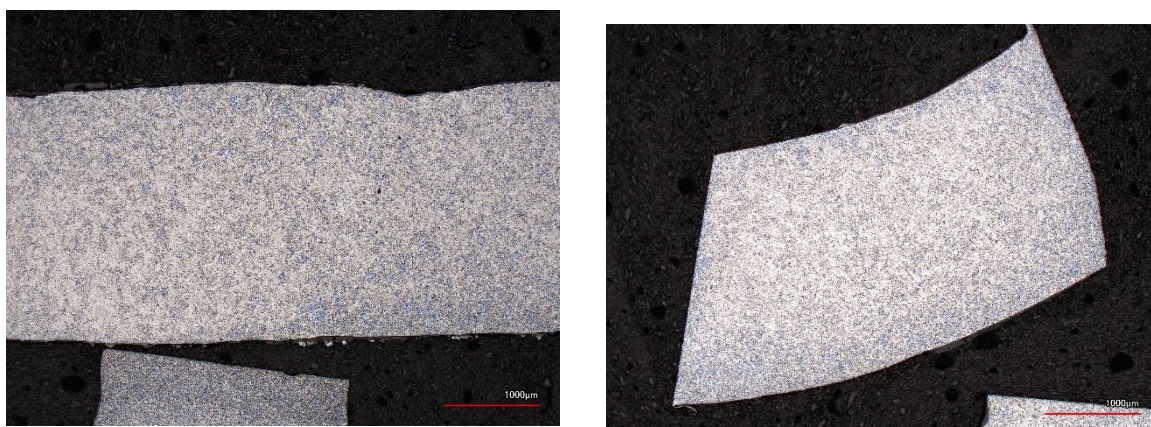
	A1	A2	A3	A4
vzorek 1	2,4/2,7	2,3/2,7	2,1/2,5	2,3/2,6
vzorek 2	2,6/2,9	2,5/3,0	2,0/2,7	2,1/2,7



Podélné řezy jsou výrazně méně vlnité, jak je vidět na obrázcích 67 a 68. I zde je vizuálněji kvalitnější vzorek 1.

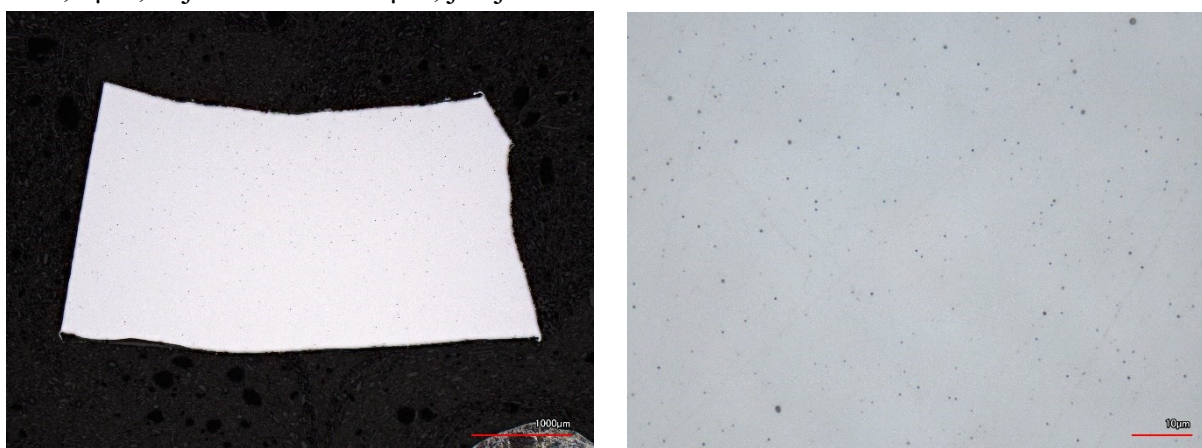


Obr. 66: Podélné řezy vzorku 1, zleva B1 a C1



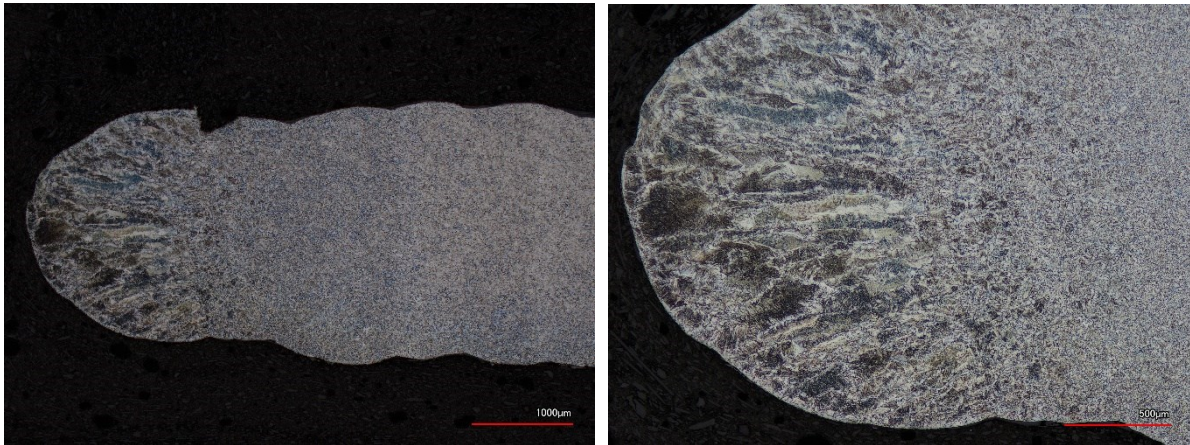
Obr. 65: Podélné řezy vzorku 2, zleva B1 a C1

V návarech nebyly pozorovány póry či vměstky významných rozměrů. V neleptaném stavu (výbrus C1) jsou patrné četné zřejmě nekovové inkluze kulového tvaru s průměrem převážně do 0,5 µm, největší kolem 10 µm, jak je vidět na obrázku 68.

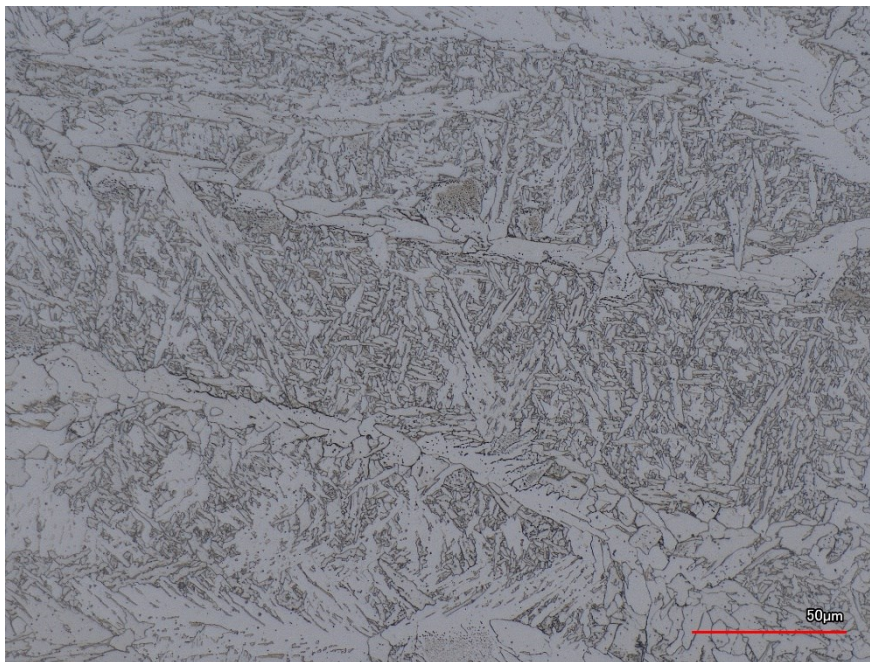


Obr. 67: Vzorek C1 v leštěném stavu s objektivem 2,5x (vlevo) a 150x (vpravo)

U vzorku 1 obsahuje výbrus A1 i poslední navařované housenky s patrnou lící mikrostrukturou na obrázku 69. Detail mikrostruktury je uveden na obrázku 70. Je tvořena bainitem/acikulárním feritem a allotriomorfním feritem.

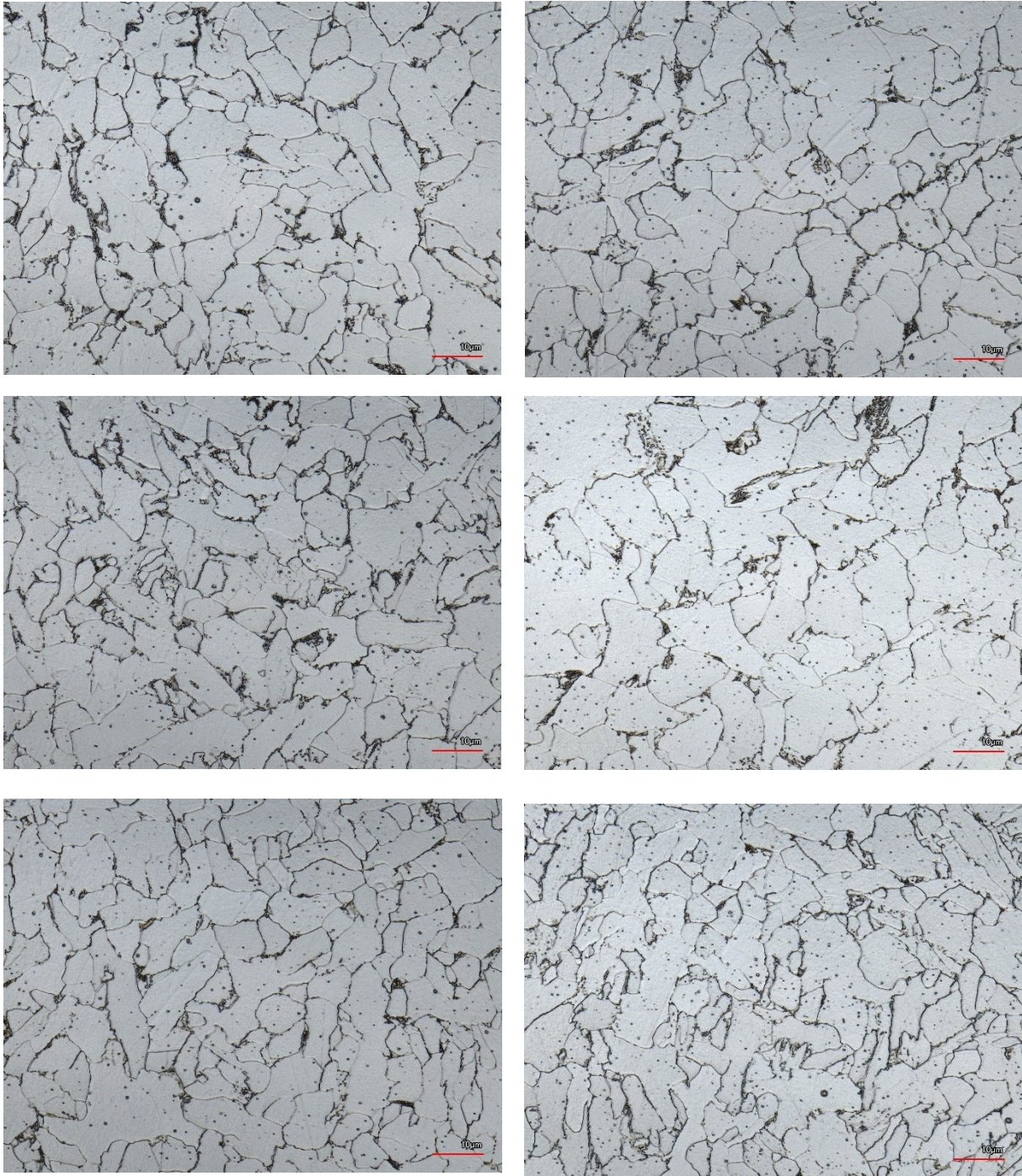


Obr. 68: Mikrostruktura vzorku 1, řezu A1, s povrchem návaru



Obr. 69: Mikrostruktura posledních housenek vzorku A1

Kromě posledních přibližně 2 mm návaru (diskutovaných výše) je mikrostruktura homogenní. V podélných a příčných řezech návarem je mikrostruktura obdobná. Vlivem teplotních cyklů při navařování dochází k opakovanému ohřevu předchozích housenek, což má za následek vznik popuštěné jemnozrné feritické struktury s malým podílem karbidické fáze u obou vzorků, což je patrné z obrázku 71.



Obr. 70: Porovnání mikrostruktury vzorku 1 (vlevo) a vzorku 2 (vpravo)  
v řezech, shora A1, A2, B1

Při použití obou plynů došlo k získání homogenní struktury vzorku. Použitý drát a technologie tedy po metalografické stránce splňují požadavky na 3D tisk.

### 4. 3. 3 Mechanické požadavky - pevnost v tahu

Zkouška byla provedena na Ústavu strojírenské technologie, VUT pomocí hydraulického stroje ZD40 na obrázku 72, který umožňuje provádět tahové zkoušky do 400 kN. Má vestavěný délkový snímač polohy příčnicku (s přesností na 0,01 mm) a snímač síly napojený na řídicí jednotku EDC 60. Vyhodnocení výsledků zpracovává v počítači program M-TEST v.1.7.

Celkově byla tahová zkouška provedena na šesti vzorcích. Tři vzorky s vrubem označeny 1V, 2V, 3V a tři vzorky bez vrubu 4P, 5P a 6P.

Vytisknuté vzorky byly krátké na to, aby bylo možné je uchytit do čelistí stroje. Proto byly na oba konce všech vzorků, určených k tahové zkoušce, přivařeny plíšky, jak je vidět na obrázku 73.



Obr. 72: Vzorky pro tahovou zkoušku

Svařování probíhalo pomocí TIG, elektrodou ER 70S-6, průměru 2 mm, se svařovacími parametry 95 A, 19.7 V, s průtokem ochranného plynu 15 l/min. Po celou dobu svařování byla pomocí ručního laserového infračerveného teploměru Raynger MX kontrolována teplota vzorku. V jeho středu nedošlo ani v jednom případě k překročení hranice 260 °C z čehož vyplývá, že střed vzorku nebyl tepelně ovlivněn, nezměnila se jeho struktura, tedy navaření prodlužovacích plíšků nebude mít vliv na tahovou zkoušku.

Před tahovou zkouškou byla u všech vzorků pomocí šuplery změřena jejich šířka „a“ a tloušťka „b“ v milimetrech, buď ve vrubu, nebo ve středu vzorků bez vrubu. Dále program spočítal obsah průřezu „s<sub>0</sub>“. Na vzorcích byly fixem naznačeny rysky vzdálené 50 mm, aby bylo možné vyhodnotit tažnost vzorků, označenou „A“. Vzorek byl následně upnut do čelistí a byla provedena tahová zkouška. Po zkoušce byla změřena vzdálenost nakreslených rysek, pro vyhodnocení tažnosti. Program M-TEST v počítači dále vyhodnotil maximální sílu



Obr. 71: Zkušební stroj ZD40

použitou při tahové zkoušce každého vzorku „ $F_m$ “, smluvní mez kluzu „ $R_{p0,2}$ “, mez pevnosti „ $R_m$ “ v megapascálech, čas trvání zkoušky „ $T$ “, a hodnotu růstu tahové síly „ $Vt_1$ “. U tahové síly, která byla nastavená na 10 MPa/s není hodnota skutečné tahové síly rovna této hodnotě, protože se jedná o hydraulický stroj, který okolo zadané hodnoty může jen kolísat. Na výsledek zkoušky to však má nepatrný vliv. Všechny výsledné hodnoty všech vzorků jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5: Výsledné hodnoty tahové zkoušky pro všechny vzorky

číslo zk.	Vzorek	a[mm]	b[mm]	S0[mm]	Fm[N]	Rp2[MP]	Rm[MPa]	A[%]	T[s]	Vt1[MPa/s]
1	1v	2,75	5,35	14,71	7947,6	410,44	540,2121	6	54,7	10,3042
2	2	2,9	14,47	41,96	8483,6	153,54	202,1686	6	23,2	7,6508616
3	2v	2,92	5,71	16,67	8850,4	496,97	530,8223	6	54,4	10,292717
4	3v	2,87	4,67	13,4	6715,6	481,38	501,052	6	51,2	9,4624355
5	4P	2,9	13,4	38,86	16195,6	327,71	416,7679	8	42,9	10,050522
6	5P	2,92	12,85	37,52	17192,8	351,92	458,2058	24	46	10,413164
7	6P	2,93	14,44	42,31	18754	338,34	443,2627	16	46,3	9,9559404

Číslo zkoušky 2 je neplatné, protože při tahové zkoušce došlo k přetržení přídavného plechu, nikoli vzorku. Pro další vzorky byl tedy použit přístříh plechu širší (15 mm) s větší tloušťkou (3 mm), jak je vidět na obrázku 73. Poté došlo k přetržení vzorků, jak je vidět na obrázku 74.

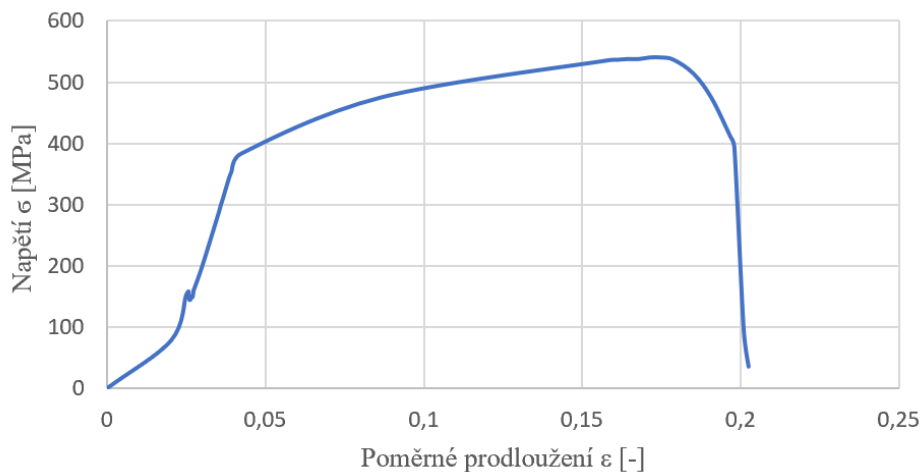


Obr. 73: Vzorky zleva 1V, 2V, 3V, 4P, 5P, 6P

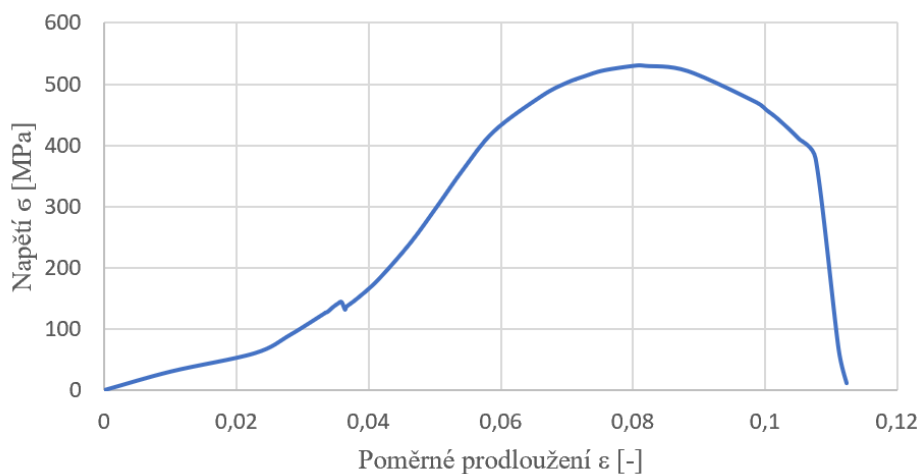
Vzorky s vrubem byly bez problému. Vzorek bez vrubu 4P byl přetržen ve svaru, je tedy pro celkové vyhodnocení označen jako nepřesný. Vzorek 6P byl přetržen mimo kontrolní rysky, je u něj tedy nepřesně vyhodnocena tažnost. U vzorku 5P a 6P byla vyhodnocena vyšší tažnost než u vzorků s vrubem z důvodu protažení celé délky vzorku, nejen okolo místa přetržení. Toto

protážení je možné prokázat vizuálním prozkoumáním. V místech, kde nastalo, byť jen mírné natažení vzorku, došlo k samovolnému odstranění, oddrolení velmi tenké tmavé povrchové strusky, zbylé po navařování. Povrch pak zůstal výrazně světlejší a lesklejší než před zkouškou. U vzorků s vrubem lze toto pozorovat jen ve vrubu v místě velmi blízkém bodu přetržení. U vzorků bez vrubu naopak po celé délce vzorku. Zmíněné opadání strusky bylo pozorováno i v průběhu zkoušky.

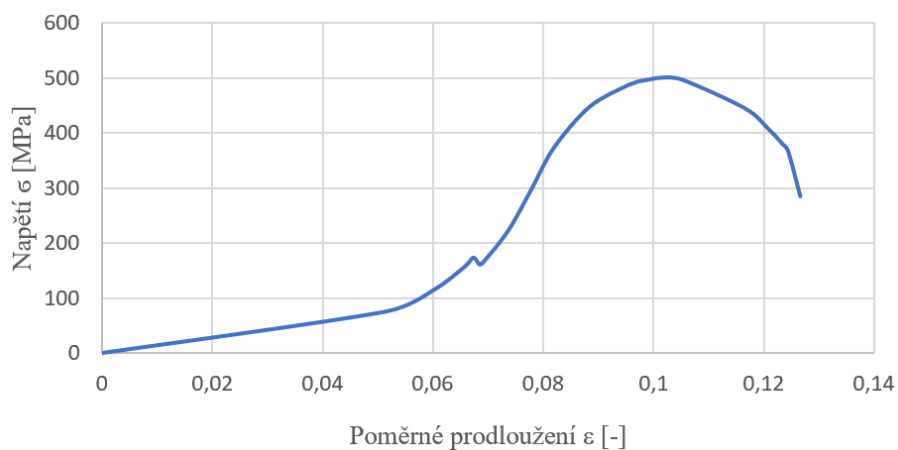
Z programu M-TEST byly vyexportovány textové soubory s hodnotami prodloužení vzorku „s“ a síly v průběhu tahové zkoušky „F“. Z hodnot prodloužení bylo spočítáno poměrné prodloužení „ε“ a ze síly napětí „σ“. Následně byly tyto hodnoty vyneseny do grafů 1-5. Tahový diagram vzorku 4P není uveden, jelikož byl vyhodnocen jako neplatný. U všech vzorků došlo k různým hodnotám poměrného prodloužení z důvodu různých průřezů, tedy různého celkového prodloužení, diskutovaného také ve spojení s tažností. U diagramu vzorku 3V v grafu 3 je oproti jiným velmi výrazná část od 0 do 0,06 hodnoty poměrného prodloužení, která je způsobena (u všech vzorků) tím, že v této oblasti, ještě čelisti tahového stroje nedržely vzorek na sto procent, ale postupně k tomu docházelo, což způsobilo postupné, z počátku mírné zatížení.



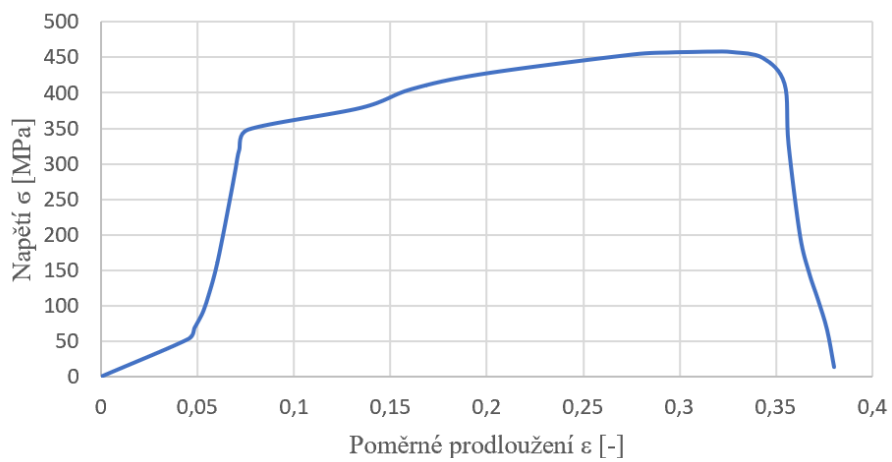
Graf 1: Tahový diagram vzorku 1V



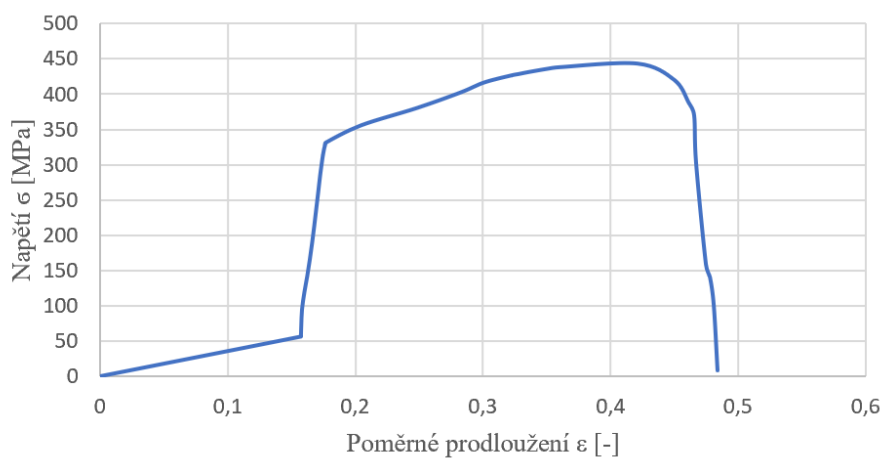
Graf 2: Tahový diagram vzorku 2V



Graf 3: Tahový diagram vzorku 3V



Graf 4: Tahový diagram vzorku 5P



Graf 5: Tahový diagram vzorku 6P

Pro vzorky s vrubem vychází průměrná mez pevnosti 524 MPa, pro vzorky bez vrubu 450,8 MPa, bez započítání vzorku 4P. Výsledné hodnoty jsou rozdílné pravděpodobně kvůli nepřesnému měření tloušťky vzorků bez vrubu. Pomocí šuplery nebylo možné změřit tloušťku vzorků přesně, z důvodu jejich vrásčitého povrchu. Ten je možné pozorovat v kapitole o makrostruktuře. Na obrázku 65 lze pozorovat odchylky mezi maximem a minimem. Šuplerou změřené tloušťky jsou tedy větší než reálné, na základě kterých, měl být spočítán průřez. Reálná tloušťka byla tedy menší než změřená. Minimální příspěvek k nepřesnému měření tloušťky šuplerou mohla mít i struska, která nebyla před měřením odstraněna/obrobena ze vzorku. To zapříčinilo ve výpočtu průřezu jeho větší hodnotu a následně menší hodnotu při výpočtu meze pevnosti. Proto nebudou vzorky bez vrubu porovnávány s původními materiálovými charakteristikami svařovacího drátu. Hodnota meze pevnosti původního materiálu je 560 MPa. Vzorky s vrubem se k této hodnotě v průměru blíží a jsou menší o 36 MPa, což je zanedbatelná hodnota a výsledek zkoušky je tedy po mechanické stránce vyhovující.

Pro vzorky s vrubem vychází průměrná mez kluzu 462,9 MPa, pro vzorky bez vrubu 345,1 MPa, bez započítání vzorku 4P. Rozdílnost hodnot je způsobena stejným problémem jako při měření meze pevnosti. Hodnota meze kluzu původního materiálu je 470 MPa. Vzorky s vrubem jsou oproti této hodnotě v průměru jen o 7,1 MPa menší, což je vyhovující.

Vypočítaná tažnost 24 % u vzorku 5P vyhovuje a koreluje s tažností základního materiálu drátu v materiálovém listu, která je 26 %. U vzorku 6P je tažnost určena nepřesně z důvodu přetržení mimo rysky, avšak hodnota tažnosti 16 % je s přihlédnutím k chybě měření vyhovující. U všech tří vzorků s vrubem vyšla tažnost pouze 6 %, což je výrazně méně oproti původnímu materiálu drátu. Tak velký rozdíl může být způsoben nestandardním průběhem zkoušky, a nestandardními vzorky.

#### 4. 3. 4 Mechanické požadavky – tvrdost [72]

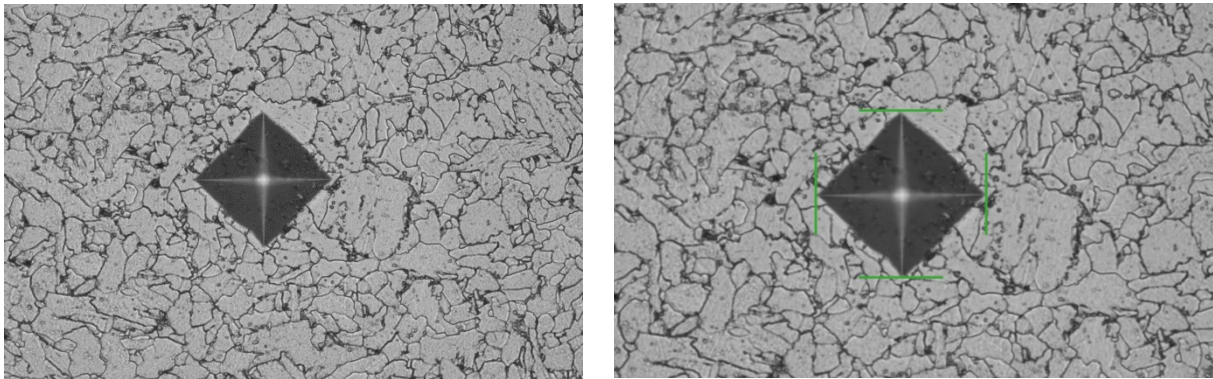
Hodnocení tvrdosti proběhlo na automatickém tvrdoměru/ mikrotvrdoměru Qness, řady Q10A, který je vidět na obrázku 74. Vyhodnoceno pomocí programu Qpix Control 2. Značení Q10 udává možný rozsah zkušebního zatížení vzorku od 0,49 do 98,01 Newtonu. Písmeno A udává rozsah vybavení. Šestiosá revolverová hlava je osazena měřicími indentory a zvětšujícími objektivy. Díky tomu dokáže stroj měřit tvrdost různými metodami (Vickers, Brinell, Knoop). V ose Z, která je kolmá k měřicímu stolu, je realizován pohyb indentoru a objektivů. Měřicí stůl zajišťuje polohování vzorku v osách X a Y, což je kontrolováno optickými pravítky pro přesné a opakovatelné měření.



Obr. 74: Tvrdoměr / mikrotvrdoměr Qness, Q10A 1 [72]



Tvrlost byla měřena na dvou vzorcích, vždy pomocí tří vpichů ve vzdálenosti přibližně 2 mm, se zatížením HV 0,2, jedná se tedy o zkoušku mikrotvrlosti. Použitá doba zatížení byla rovna standartní době 10-15 sekund. Na obrázku 75 je vidět vpich bez i s pomocnými čarami sloužícími k vyhodnocení zkoušky.



Obr. 75: Vtisk indentoru do zkoušeného vzorku. Vlevo bez, v pravo s pomocnými čarami.

Tabulky 6 a 7 uvádějí rozměry jednotlivých vpichů a výsledné tvrlosti každého změřeného vpichu, které byly zpracovány pomocí integrovaného softwaru v přístroji.

Tabulka 6: Zkouška tvrlosti vzorku 1

Číslo vpichu	d1 [mm]	d2 [mm]	Tvrlost [HV 0,2]
1	0,04877	0,04835	157
2	0,04815	0,04709	164
3	0,04667	0,0473	168

Tabulka 7: Zkouška tvrlosti vzorku 2

Číslo vpichu	d1 [mm]	d2 [mm]	Tvrlost [HV 0,2]
1	0,0481	0,04774	161
2	0,04836	0,04876	157
3	0,04794	0,04812	161

Při zprůměrování všech vpichů vychází celková tvrlost materiálu 161,3 HV 0,2. Výsledek je vyhovující, jedná se o měkkou konstrukční ocel, která u běžných výrobků vykazuje podobné hodnoty tvrlosti materiálu.

## 5 ZÁVĚRY

Diplomová práce předkládá souhrn norem specifikující 3D tisk kovů se zaměřením na drátové technologie, které každou obecně popisuje a příkládá jejich využití v praxi, nebo výzkumu. Popisuje postup zkoušení výtisků s ohledem na normu ČSN EN ISO 17296 o aditivní výrobě. Uvádí vyčíslení investic potřebných pro upgrade a modifikaci stávajícího robotického pracoviště při ústavu strojírenské technologie, VUT, aby bylo možné 3D tisknout.

Praktická část ověřuje vhodnost svařovacího drátu EN ISO 14341-A: G 3Si1 k 3D tisku technologií Cold Metal Transfer, CMT, a její konkrétní modifikací Cycle Step. Zkušební výtisk tenkostěnné kostky 100 x 100 x 100 milimetrů, byl rozřezán na vzorky rozměrů 30 x 80 milimetrů, které byly podrobeny povrchovým i mechanickým zkouškám. Povrchová kvalita návaru byla ověřena pomocí penetrační zkoušky a zkoumáním mikro a makro struktury. Mechanické vlastnosti byly vyhodnoceny pomocí tahové zkoušky a zkoušky tvrdosti podle Vickerse.

Penetrační zkouška měla vyhovující výsledek. K jejímu ověření došlo na přebroušených vzorcích. Vytisknutý materiál neměl žádné póry, ani jiné povrchové vady. Při zkoumání makrostruktury byl vyhodnocen rozdíl v použití dvou ochranných plynů s různým podílem CO<sub>2</sub> a Ar. Výtisk s 8 % CO<sub>2</sub> měl lepší vzhled a menší vlnitost stěny, oproti výtisku s 18 % CO<sub>2</sub>. Dále byly tedy zkoumány pouze vzorky s 8 % CO<sub>2</sub>.

Tahová zkouška byla provedena na třech vzorcích s vrubem a třech vzorcích bez vrubu. Všechny vzorky měly nestandardní rozměry, tedy i výsledek zkoušek byl do jisté míry ovlivněn. U vzorků s vrubem byla průměrně naměřena mez pevnosti 524 MPa, což je o 36 MPa méně, než je uvedeno v materiálovém listu drátu. Průměrně naměřená mez kluzu byla 462,9 MPa, což je o 7,1 MPa méně, než uvádí materiálový list. Odchyly jsou minimální, výsledek je tedy vyhovující a splňuje požadavek na výrobek. Tvrdost byla vyhodnocena jako poslední a taktéž vyhovuje.

Celkově je s daným materiálem 3D tisk za pomoci CMT proveditelný bez problémů s vyhovujícími povrchovými i materiálovými vlastnostmi.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. 3D PRINTING AND ADDITIVE MANUFACTURING: *Principles and Applications Fifth Edition of Rapid Prototyping*. 5. vydání. Singapur: World Scientific, 2014. ISBN 978-981-3146-75-4.

2. *Huisman úspěšně otestoval první jeřábový hák na světě vyrobený 3D tiskem* [online]. ČR: Technika a trh, 2018 [cit. 2020-8-1]. Dostupné z: <https://www.technikaatrh.cz/obrabeni/huisman-uspesne-otestoval-prvni-jerabovy-hak-na-svete-vyrobeny-3d-tiskem>

3. *Navarování metodou WAAM* [online]. ČR: MM Průmyslové Spektrum, 2018 [cit. 2020-8-2]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-metodou-waam.html>

4. *New manufacturing milestone: 30,000 additive fuel nozzles* [online]. Auburn, Alabama: GE Additive, 2018 [cit. 2020-8-3]. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/stories/new-manufacturing-milestone-30000-additive-fuel-nozzles>

5. *Additive Manufacturing Overview* [online]. West Conshohocken, USA: ASTM International, 2017 [cit. 2020-8-4]. Dostupné z: <https://www.astm.org/industry/additive-manufacturing-overview.html>

6. ÁLVARO, Rodríguez-Prieto, Ana Maria CAMACHO, Ana ARAGÓN, Miguel SEBASTIAN a Ángel YANGUAS-GIL. *Analysis of the current scenario of additive manufacturing standardization and certification: 22nd International Congress on Project Management and Engineering*. Conference Paper, pages 1011-1023. Madrid, Spain: AEIPRO IPMA, 2018.

7. *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. Designation: F2792 – 12a. West Conshohocken, USA: ASTM International, 2013.

8. *Quick reference: 7 Families of Additive Manufacturing*. HYBRID Manufacturing Technologies, 2015.

9. PETRENEC, J. *Možnosti replikace rozstříkovacích trysek metodou 3D tisku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 56 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

10. C.M. BEKKER, Anne, Jouke C. VERLINDEN a Giorgia GALIMBERTI. *CHALLENGES IN ASSESSING THE SUSTAINABILITY OF WIRE + ARC ADDITIVE MANUFACTURING FOR LARGE STRUCTURES*: Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. An Additive Manufacturing Conference Reviewed Paper. Faculty of Industrial Design Engineering, Delft University of Technology, Netherlands; Department of Mechanical Engineering, Politecnico di Milano, Italy, 2016.

11. WANG, F., J. MEHNEN, S.W. WILLIAMS, P. COLEGROVE a F. MARTINA. *Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V*. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012, 2012(6), 1377-1386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.02.002>.

12. S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal & P. Colegrove (2016) *Wire + Arc Additive Manufacturing, Materials Science and Technology*, 32:7, 641-647, DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000073 To link to this article: <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>

13. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001, 395 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0

14. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.

15. KOUKAL, Jaroslav; ZMYDLENÝ, Tomáš. *Svařování I*. 1. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. 136 s. ISBN 978-80-248-0870-3.

16. FOLDYNA, Václav, Jaroslav PURMENSKÝ, Drahomír SCHWARZ, et al. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. ISBN 80-857-7185-3

17. MAJER, Lubomír, Jiří PODHORA, Miroslav SUCHÁNEK a Stanislav VEJVODA. *Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 1999, 249 s. ISBN 80-857-7170-5

18. *Současný vývoj v oblasti svařování* [online]. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie: MM Průmyslové Spektrum, 2018 [cit. 2020-8-5]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/soucasny-vyvoj-v-oblasti-svarovani>

19. *Welding processes: Cold Metal Transfer* [online]. ČR: Fronius, 2019 [cit. 2020-8-6]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/our-expertise/welding-processes/cmt>

20. *Nový standard ve svařovací technice Proces CMT (Cold Metal Transfer): Z textových podkladů firmy Fronius* [online]. Praha: Business Media CZ, 2006 [cit. 2020-8-10]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/novy-standard-ve-svarovaci-technice-proces-cmt-cold-metal-transfer\\_10667.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/novy-standard-ve-svarovaci-technice-proces-cmt-cold-metal-transfer_10667.html)

21. *Heat Affected Zone – Causes, Effects and How to Reduce It* [online]. Manchester, UK: Barclays Eagle Lab, 2019 [cit. 2020-8-17]. Dostupné z: <https://fractory.com/heat-affected-zone-causes-effects-reduction>

22. *The Complete Guide to Laser Powder Bed Fusion in 3D Printing* [online]. 3D Natives, 2019 [cit. 2020-8-18]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/direct-metal-laser-sintering100420174-2/#!>

23. *WAAM 3D COMPLETES SERIES A FUNDING ROUND WITH INVESTMENT FROM ACCURON TECHNOLOGIES* [online]. 3D Printing Industry, 2020 [cit. 2020-8-18]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/waam3d-completes-series-a-funding-round-with-investment-from-accuron-technologies-168146/>

24. *WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING: ECONOMICAL 3D PRINTING FOR METAL* [online]. Fronius, 2019 [cit. 2020-9-6]. Dostupné z: [https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/informacni-centrum/tisk/waam#id\\_9626e352-43f3-4be6-a423-85348ca40538\\_13e1135b-2413-4690-a298-51e1d17cd52d](https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/informacni-centrum/tisk/waam#id_9626e352-43f3-4be6-a423-85348ca40538_13e1135b-2413-4690-a298-51e1d17cd52d)

25. *CMT CYCLE STEP FROM FRONIUS: A NEW LEVEL OF WELDING PROCESS CONTROL* [online]. Fronius, 2018 [cit. 2020-9-6]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/info-centre/press/cmt-cycle-step>

26. ŠOULÁK, Petr. *Aplikace CMT Advanced v průmyslové praxi*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

27. *PUSHPULL SYSTEMS* [online]. Fronius [cit. 2020-5-20]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/robotic-welding/migmag-single-wire/pushpull-systems/pushpull-systems>

28. *RAMLAB UNVEILS WORLD'S FIRST CLASS APPROVED 3D PRINTED SHIP'S PROPELLER* [online]. Rotterdam, Netherlands: RAMLAB, 2017 [cit. 2020-9-6]. Dostupné z: <https://www.ramlab.com/updates/ramlab-unveils-worlds-first-class-approved-3d-printed-ships-propeller/>

29. EVGENIJ, Borodin. *Naváňování 3D struktur metodou WAAM*. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2018. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.

30. *CMT Cycle Step* [online]. Fronius, 2018 [cit. 2020-9-8]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/info-centre/press/cmt-cycle-step>

31. *MX3D Projects* [online]. Amsterdam, Netherlands: MX3D, 2020 [cit. 2020-9-10]. Dostupné z: <https://mx3d.com/projects>

32. *CMT Cycle Step* [online]. Youtube: Fronius, 2018 [cit. 2020-9-11]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/embed/RF8LpG1Ae5w?rel=0&autoplay=1>

33. *Industrial gas turbine blade* [online]. Milton Keynes, United Kingdom: WAAM3D, 2019 [cit. 2020-9-11]. Dostupné z: [https://waam3d.com/case\\_studies/case\\_gas-turbine-blade](https://waam3d.com/case_studies/case_gas-turbine-blade)

34. ZHANG, Xiaoyong, Kehong WANG, Qi ZHOU, Jilao DING a Supriyo GANGULY. *Microstructure and mechanical properties of TOP-TIG-wire and arc additive manufactured super duplex stainless steel (ER2594)*. 2019. Materials Science and Engineering: A, Volume 762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138097>.

35. AYARKWA, K.F., J. DING a S. W. WILLIAMS. *Assessing the effect of TIG alternating current time cycle on aluminium wire + arc additive manufacture*. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.005>.

36. MA, Ya, Dominic CUIURI, Chen SHEN, Huiju LI a Zengxi PAN. *Effect of interpass temperature on in-situ alloying and additive manufacturing of titanium aluminides using gas tungsten arc welding*. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2015.08.001>.

37. DING, Jialuo, Zewu QIA, Baoqiang CONGA, Bojin QIA, Hongye SUN a Gang ZHAO. *Microstructure and mechanical properties of double-wire + arc additively manufactured Al-Cu-Mg alloys*. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.12.019>.

38. WANG, Kehong, Yuehai FENG, Bin ZHAN a Jie HE. *The double-wire feed and plasma arc additive manufacturing process for deposition in Cr-Ni stainless steel*. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.04.040>.

39. *NORSK TITANIUM ADDITIVE MANUFACTURING RECOGNIZED IN BOEING MATERIAL ALLOWABLES PROGRAM* [online]. 3D Printing Industry, 2019 [cit. 2021-9-12]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/norsk-titanium-additive-manufacturing-recognized-in-boeing-material-allowables-program-157146/>

40. *SPIRIT AEROSYSTEMS RECEIVES FIRST NORSK TITANIUM 3D PRINTED PART* [online]. 3D Printing Industry, 2019 [cit. 2020-9-12]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/spirit-aerosystems-receives-first-norsk-titanium-3d-printed-part-146285>

41. ARTAZA, Teresa, Alfredo SUÁREZ, Maialen MURUA, J.C. GARCÍ, Iván TABERNERO a Aitzol LAMIKIZ. *Wire Arc Additive Manufacturing of Mn4Ni2CrMo Steel: Comparison of Mechanical and Metallographic Properties of PAW and GMAW*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.10.035>.

42. *Giant Satellite Fuel Tank Sets New Record For 3-D Printed Space Parts: Tank delivery time slashed from two years to three months, continues Lockheed Martin sprint to cut satellite cost and schedule by 50 percent* [online]. Lockheed Martin, 2018 [cit. 2021-9-13]. Dostupné z: [https://news.lockheedmartin.com/2018-07-11-Giant-Satellite-Fuel-Tank-Sets-New-Record-for-3-D-Printed-Space-Parts#assets\\_all](https://news.lockheedmartin.com/2018-07-11-Giant-Satellite-Fuel-Tank-Sets-New-Record-for-3-D-Printed-Space-Parts#assets_all)

43. *Make Metal Parts Faster & Cheaper with EBAM® Metal 3D Printing Technology* [online]. Sciaky, 2020 [cit. 2020-9-13]. Dostupné z: <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology>

44. *Laser additive manufacturing of metal: Manufacturing applications – overview* [online]. Laserline, 2020 [cit. 2020-9-13]. Dostupné z: <https://www.laserline.com/en-int/laser-additive-manufacturing/>

45. *Wire-laser Additive Manufacturing* [online]. Cranfield University, 2017 [cit. 2020-9-14]. Dostupné z: <https://www.cranfield.ac.uk/research-projects/wire-laser-additive-manufacturing>

46. ČSN EN ISO 17296. *Aditivní výroba- Základní principy*. Český normalizační institut. 2017

47. ČSN EN ISO 16348. *Kovové a jiné anorganické povlaky – Definice a dohody týkající se vzhledu*. Český normalizační institut. 2003

48. ČSN EN ISO 3452. *Nedestruktivní zkoušení – Kapilární metoda*. Český normalizační institut. 2015

49. ČSN EN ISO 6507. *Kovové materiály – zkouška tvrdosti podle Vickerse*. Český normalizační institut. 2018

50. ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – zkoušení tahem*. Český normalizační institut. 2020

51. ČSN EN ISO 17639. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Mikroskopická a makroskopická kontrola svarů*. Český normalizační institut. 2014

52. *MX3D to 3D print a steel bridge in Amsterdam* [online]. MX3D, 2015 [cit. 2020-10-13]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=pZNTzkAR1Ho&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?v=pZNTzkAR1Ho&feature=emb_logo)

53. XU, Fangda, Vimal DHOKAI, Paul COLEGROVE, Anthony MCANDREW a Stewart WILLIAMS. *Realisation of a multi-sensor framework for process monitoring of the wire arc additive manufacturing in producing Ti-6Al-4V parts*. Pages 785-798. International Journal of Computer Integrated Manufacturing Volume 31, 2018 - Issue 8: Smart Automation and Manufacturing, 2018. DOI:10.1080/0951192X.2018.1466395.

54. *LINCOLN ELECTRIC ACQUIRES BAKER INDUSTRIES FOR ADDITIVE MANUFACTURING BUSINESS LAUNCH* [online]. 3D Printing Industry, 2019 [cit. 2020-10-15]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/lincoln-electric-acquires-baker-industries-for-additive-manufacturing-business-launch-152757/>

55. *Product List* [online]. Fronius, 2020 [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/product-list>

56. *VLIV OCHRANNÝCH PLYNŮ NA VLASTNOSTI SVAROVÉHO SPOJE PŘI SVAŘOVÁNÍ NELEGOVANÝCH KONSTRUKČNÍCH OCELÍ METODOU 135 - MAG* [online]. Air Luquide, SDP-Kovo [cit. 2020-10-17]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/365082-Vliv-ochrannych-plynu-na-vlastnosti-svaroveho-spoje-pri-svarovani-nelegovanych-konstrukcnich-oceli-metodou-135-mag.html> CIT 15.10.2020

57. *Technologie II.- část 1, opora svařování UST* [online]. Brno: VUT v Brně, 2020 [cit. 2020-10-17]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/studium/index.php?stranka=opory>

58. SOPRUNENKO, Valeriia. Optimalizace parametrů svařování na robotech pro automobilový průmysl [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zavprace/detail/124690>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Marián Sigmund.

59. *Fronius: CMT Advanced: English* [online]. Fronius, 2010 [cit. 2020-10-19]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=\\_WrhWf9XLHM](https://www.youtube.com/watch?v=_WrhWf9XLHM)

60. *Technologie II.- část 2, opora svařování UST* [online]. Brno: VUT v Brně, 2020 [cit. 2020-10-17]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/studium/index.php?stranka=opory>

61. GÖKHAN DEMIR, Ali. *Micro laser metal wire deposition for additive manufacturing of thin-walled structures*. Department of Mechanical Engineering, Politecnico di Milano, Milan, Italy, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.07.003>

62. *ADDITIVE MANUFACTURING Reinvent Your Metal Production* [online]. DMG Mori, 2020 [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/resource/blob/71066/bfb21cc28b1e4aed1ca0ca7429dfd993/pl0uk-additive-manufacturing-pdf-data.pdf>

63. *7 Families of Additive Manufacturing* [online]. HYBRID Manufacturing Technologies, 2020 [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <https://hybridmanutech.com/resources/>

64. DHOKIA, Vimal, Joseph M.FLYNN, Alborz SHOKRANI a Stephen T.NEWMAN. *Hybrid additive and subtractive machine tools – Research and industrial developments*. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.11.007>.

65. *Hybrid Manufacturing Technologies* [online]. HYBRID Manufacturing Technologies, 2020 [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: <http://www.hybridmanutech.com/>

66. *The Synergies of Hybridizing CNC and Additive Manufacturing* [online]. HYBRID Manufacturing Technologies, 2016 [cit. 2020-11-5]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Synergies-of-Hybridizing-CNC-and-Additive-Jones/ca8e2e920ebc7eb5abfbca7e505e0faa3d71a5c6>



67. MAA, Guangyi, Dongjiang WUA, Dehua LIU, Fangyong NIU, Qiuyu MIAO, Kai ZHAO, Bokai TANG a Guijun BIC. *Al–Cu alloy fabricated by novel laser-tungsten inert gas hybrid additive manufacturing*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100954>.

68. Analysis on the microstructure regulation based on the pulsed laser oscillating molten pool in Laser-PTA additive manufacturing, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.004>

69. LIU, Jingtao, Zhenglong LEI, Bingwei LI, Jiang BI, Pingguo ZHU a Wei LU. *Influence of the laser thermal effect on the droplet transfer behavior in laser-CMT welding*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105728>

70. ČSN EN ISO 1302. *Geometrické požadavky na výrobky. Označování struktury povrchu v technické dokumentaci výrobků*. Český normalizační institut. 2002

71. ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy posuzování struktury povrchu*. Český normalizační institut. 1999

72. Tvrdoměr Q10/Q30/Q60. Metalco Testing [online]. Metalco Testing [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: <https://www.metalco.cz/mikrotrvrdomery-vickers-aknoop/tvrdomer-q10-q30-q60-varianta-a/>.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
$C_e$	Uhlíkový ekvivalent	[%]
$d$	Aritmetický průměr uhlopříček $d_1$ a $d_2$	[-]
$F$	Zkušební zatížení	[N]
$g_n$	Tíhové zrychlení díky gravitaci	[m/s <sup>2</sup> ]
HV	Tvrdost podle Vickerse	[-]
$I$	Napětí	[A]
$k$	Proporcionální koeficient	[-]
$L_0$	Výchozí délka vzorku	[mm]
$Q$	Vnesené teplo	[kJ·mm <sup>-1</sup> ]
$S_0$	Výchozí obsah průřezu vzorku	[mm]
$t$	Tloušťka plechu	[mm]
$U$	Napětí	[V]
$v$	Rychlost svařování	[mm·s <sup>-1</sup> ]
$d$	Průměr	[mm]
$d_o$	Průměr čepu	[mm]
$\alpha$	Průměrný úhel mezi protilehlými stranami vrcholu vnikajícího tělesa ve tvaru jehlanu (nominálně 136°)	[°]
$\varepsilon$	Poměrné přetvoření	[-]
$\sigma$	Napětí	[MPa]
$\eta$	tepelná účinnost přenosu tepla	[-]

## SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1: Ukázky 3D tisku nahoře dvě struktury, dole vlevo lodní hák, vpravo forma [2], [3]....	1
Obr. 2: Palivová tryska vyrobená 3D tiskem [4].....	2
Obr. 3: Vat Photopolymerization [8].....	3
Obr. 4: Binder Jetting [8] .....	3
Obr. 5 Material Jetting [8].....	3
Obr. 6 Sheet Lamination [8].....	4
Obr. 7 Material Extrusion [8] .....	4
Obr. 8 Powder Bed Fusion [8] .....	4
Obr. 9 Directed Energy Deposition [8] .....	4
Obr. 10: Powder Bed Fusion [22] .....	5
Obr. 11: Direct Energy Deposition [23].....	5
Obr. 12: 3D tisk kovu pomocí robota [52] .....	12
Obr. 13: Ukázka TOO po svaření trubky [21] .....	13
Obr. 14: Ohyb součásti vytisknuté pomocí WAAM [53] .....	13
Obr. 157: Impulsní přenos kovu [56] .....	15
Obr. 16: Zkratový přenos kovu [56].....	15
Obr. 17: šesti-osý robot (vlevo) a centrum pro svařování třením (vpravo) [12].....	16
Obr. 18: Součást podvozku [12].....	17
Obr. 19: Nosník křídla [12].....	17
Obr. 20: Pracoviště pro WAAM [54].....	18
Obr. 21: Lodní šroub vyrobený pomocí WAAM [28] .....	19
Obr. 22: Most vytisknutý pomocí WAAM [31].....	19
Obr. 23: Večerní bar a detail konstrukce [31].....	20
Obr. 24: Různé svařovací zdroje [55] .....	21
Obr. 25: Příklad 3D výtisku [24].....	22
Obr. 26: Princip metody CMT [26].....	22
Obr. 27: CMT hořák na robota [27] .....	23
Obr. 28: Robotická sestava pro svařovací proces CMT [27] .....	23
Obr. 29: Návar pomocí CMT [29] .....	24
Obr. 30: Návar pomocí MAG [29].....	24
Obr. 31: Lopatka turbíny [33] .....	24
Obr. 32: Konzolový nosník [33] .....	24
Obr. 33: CMT Cycle Step [30].....	24
Obr. 34: Proces CMT Cycle Step [32] .....	25
Obr. 35: Cyklus procesu CMT Advanced [58] .....	25
Obr. 36: Hliníkové žebro křídla [12].....	25
Obr. 37: Schéma TOPTIG a klasický TIG [34] .....	26
Obr. 38: Provnání návarů při použití ACTIG [34].....	26
Obr. 39: Schéma přímého legování [36] .....	26
Obr. 40: Titanová součást [40] .....	36
Obr. 41: Stěna vytisknutá pomocí PAW vlevo, pomocí GMAW vpravo [41] .....	36
Obr. 42: Dvoudrátový EBAM [43] .....	37
Obr. 43: Jednodrátový EBAM [43].....	37
Obr. 44: Kopule palivové nádrže [42].....	37

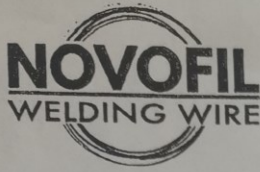
Obr. 45: Výtisk mikroWLAM [44] .....	38
Obr. 46: WLAM součást [44] .....	38
Obr. 47: Hybridní výroba součásti [62] .....	39
Obr. 48: Nástroje dodávané firmou Hybrid Manufacturing Technologies [65] .....	39
Obr. 49: Schematické vysvětlení výhody hybridní výroby [66] .....	39
Obr. 50: Schéma laser-TIG [67].....	40
Obr. 51: Tavení drátu při CMT(a), laser-CMT(b) [69].....	40
Obr. 52: Svářečí robotické pracoviště ÚST.....	41
Obr. 53: Svářečské robotické pracoviště ÚPT, AV .....	43
Obr. 54: 3D výtisk, kostka .....	44
Obr. 55: Ruční pila Streurs Labotom-5 .....	45
Obr. 56: Bruska Saphir 330.....	45
Obr. 57: Vzorky po broušení.....	46
Obr. 58: Nanesení penetrantu.....	46
Obr. 59: Nanesení vývojky.....	46
Obr. 60: Výsledek penetrační zkoušky .....	47
Obr. 61: Směr řezu vzorků .....	47
Obr. 62: Příčné řezy vzorku 1 zleva A1 a A2 .....	47
Obr. 63: Příčné řezy vzorku 2 zleva A1 a A2 .....	48
Obr. 64: Měření šířky stěny návaru.....	48
Obr. 65: Podélné řezy vzorku 2, zleva B1 a C1 .....	49
Obr. 66: Podélné řezy vzorku 1, zleva B1 a C1 .....	49
Obr. 67: Vzorek C1 v leštěném stavu s objektivem 2,5x (vlevo) a 150x (vpravo).....	49
Obr. 68: Mikrostruktura vzorku 1, řezu A1, s povrchem návaru .....	50
Obr. 69: Mikrostruktura posledních housenek vzorku A1 .....	50
Obr. 70: Porovnání mikrostruktury vzorku 1 (vlevo) a vzorku 2 (vpravo) v řezech, shora A1, A2, B1 .....	51
Obr. 71: Zkušební stroj ZD40 .....	52
Obr. 72: Vzorky pro tahovou zkoušku .....	52
Obr. 73: Vzorky zleva 1V, 2V, 3V, 4P, 5P, 6P.....	53
Obr. 74: Tvrdoměr / mikrotvrdoměr Qness, Q10A 1 [72].....	56
Obr. 75: Vtisk indentoru do zkoušeného vzorku. Vlevo bez, v pravo s pomocnými čarami... 57	57

## SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK A GRAFŮ

Tabulka 1: Charakteristiky výrobku 3D tisku [46] .....	6
Tabulka 2: Návod k hodnocení znaků při makro a mikro kontrolách [51] .....	11
Tabulka 3: Chemické složení drátu .....	43
Tabulka 4: Měření šířky stěny návaru min/max [mm].....	48
Tabulka 5: Výsledné hodnoty tahové zkoušky pro všechny vzorky .....	53
Tabulka 6: Zkouška tvrdosti vzorku 1.....	57
Tabulka 7: Zkouška tvrdosti vzorku 2.....	57
Graf 1: Tahový diagram vzorku 1V .....	54
Graf 2: Tahový diagram vzorku 2V .....	54
Graf 3: Tahový diagram vzorku 3V .....	55
Graf 4: Tahový diagram vzorku 5P.....	55
Graf 5: Tahový diagram vzorku 6P .....	55

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1 Materiálový list svařovacího drátu



**CUSTOMER / CLIENTE**  
SIAD CZECH SPOL s r.o.  
K Hájům 2606/2b

155 00 PRAHA 5 – STODULKY - (REPUBBLICA CECA)  
**DELIVERY:** BRANANY U MOSTU - REPUBBLICA CECA

**INSPECTION CERTIFICATE (3.1)** Analisi chimica / Chemical analysis  
**TEST REPORT (2.2)** Caratteristiche Meccaniche / Mechanical properties

Cert n°: 20712      PO. n° 70PK-190506/103 / 6.5.2019      COLATA / BATCH n°: 804160      DATA/DATE: 24/05/2019

**NOME DEL PRODOTTO / PRODUCT NAME:** NOVOFIL SG2  
**STANDARD CLASSIFICATION:** AWS A5.18: ER70S-6 | EN ISO 14341-A: G 3Si1 | G 38 2 C1 3Si1 | G 42 4 M21 3Si1  
CSA W48 | B-G 49A 3 C1 S6 | B-G 49A 3 M21 S6

**DETTAGLI PRODOTTI / PRODUCT DETAILS:**  
DIAM.1.20 mm P.L.W. K-300 (Kg.2.304) - DIAM.1.00 mm P.L.W. K-300 (Kg.17.280)  
DIAM.0.80 mm P.L.W. K-300 (Kg.2.304) - DIAM.0.80 mm Kg.5 D-200 (Kg.1.100)

**CHEMICAL COMPOSITION | COMPOSIZIONE CHIMICA**

Acc. to EN 10204 - 3.1

C	Mn	S	P	Si	Cu	Al	Mo	Ni	Cr	Ti	N	V
0.075	1.435	0.002	0.013	0.840	0.015	0.004	0.002	0.006	0.012	0.002	0.005	0.002

**MECHANICAL PROPERTIES OF ALL WELD METAL | CARATTERISTICHE MECCANICHE**  
(Shielding gas 80% Argon + 20% CO<sub>2</sub>, and 100% CO<sub>2</sub>) | Typical data / acc. to EN 10204 - 2.2

	M21		C1	
	Value / Valore	STAND	Value / Valore	STAND
Yield strength Re / Snervamento	470 MPa	> 420 Mpa	440 Mpa	> 400 Mpa
Tensile strength Rm / Carico di Rottura	560 MPa	> 500 Mpa	530 MPa	> 480 Mpa
Elongation A5d / Allungamento	26%	> 22%	26%	> 22%
Impact test Kv (-40°C) / Resilienza	90 J	> 47 J	-	> 47 J
Impact test Kv (-30°C) / Resilienza	60 J	> 47 J	-	> 47 J
Impact test Kv (-20°C) / Resilienza	70 J	> 47 J	70 J	> 47 J
Impact test Kv (+20°C) / Resilienza	70 J	> 47 J	-	> 47 J



**COMMENT:**

We hereby confirm that the material herein described has been manufactured, sampled, tested and inspected in accordance with referred standards. Product supplied under a QA Programme fulfilling the EN ISO 9001 standard. This certificate is produced electronically and is valid without signature.

**NOVOFIL S.p.A.**

S.S. 7 bis Km. 306,900 - 83030 Manocalzati (AV) Italia | Tif. +39 0825 675451-52 | Fax +39 0825 675164 | www.novofil.it | info@novofil.it  
Capitale Sociale Euro 1.232.400 i.v. | N. Iscr. Reg. Imprese, C.F. e Part. IVA IT 01666380645 | C.C.I.A.A. Avellino N. REA AV - 97138